

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Trupina

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Student:

Ivan Trupina

Zagreb, 2017.

IZJAVA:

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se vlastitim znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, uz pomoć navedene literature.

Zahvaljujem se svojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Veri Rede na pomoći, savjetima, utrošenom vremenu i trudu, te ustupljenoj literaturi. Također, zahvaljujem se Zrinki Šokčević, mag. appl. chem i dr. sc. Sari Essert za veliku količinu pomoći s praktične strane i utrošenom vremenu.

Zahvaljujem se Stjepanu Milošu, vlasniku stolarije „Stolarija MS“ na ustupljenom materijalu, ali isto tako i Ivanu Sočecu, na utrošenom vremenu za izradu potrebnih uzoraka za ispitivanje.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, djevojci i kolegama na strpljenju, povjerenju i iznimnoj podršci tijekom studiranja.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Trupina** Mat. br.: 0035193982

Naslov rada na
hrvatskom jeziku: **Utjecaj mikrostrukture na abrazijska svojstva drva**

Naslov rada na
engleskom jeziku: **Effect of Microstructure on the Abrasion Resistance of Wood**

Opis zadatka:

Drvo je kroz cijelu povijest ljudskog roda vrlo važan tehnički materijal. I danas, kad ga sve više iz primjene istiskuju laki metali, polimeri i kompoziti, drvo ima nezamjenjivu ulogu. Drvo je prirodan kompozitni materijal, a njegova struktura je određena njegovim biološkim funkcijama. Izrazito je usmjerena i od vrste do vrste se dosta razlikuje. Takva mikrostruktura određuje fizikalna, mehanička i preradbena svojstva drva. Sva navedena svojstva dosta variraju čak unutar iste vrste drva. Također je velika međusobna razlika u vrijednostima svojstava za tri karakteristična presjeka: aksijalni, radijalni i tangencijalni.


Cilj rada je istražiti utjecaj mikrostrukture na ponašanje drva u uvjetima abrazijskog trošenja. Ispitivanje provesti na poprečnom (aksijalnom) presjeku drva, a vrste izabrati iz skupine listača s prstenasto poroznom i rastresito poroznom mikrostrukturom te iz skupine četinjača koje nemaju pore. Pri ispitivanju treba varirati kvalitetu brusnog papira, od vrlo finih do najgrubljih. Na temelju dobivenih rezultata potrebno je zaključiti kako poroznost u kombinaciji s veličinom abrazivnog zrna utječe na otpornost drva prema abrazijskom trošenju.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

11. svibnja 2017.

Zadatak zadala:


Izv. prof. dr. sc. Vera Rede

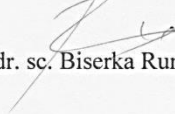
Rok predaje rada:

13. srpnja 2017.

Predviđeni datum obrane:

19., 20. i 21. srpnja 2017.

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	1
POPIS TABLICA.....	4
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA	5
SAŽETAK.....	6
SUMMARY:	7
1. UVOD	8
2. STRUKTURA DRVA.....	9
2.1. Botanička podjela	9
2.2. Makrostruktura drva	10
2.2.1. Godovi.....	12
2.3. Stanična struktura drva	14
2.4. Molekularna struktura drva	20
3. SVOJSTVA DRVA.....	24
3.1. Gustoća drva	24
3.2. Vlaga u drvu	27
3.3. Mehanička svojstva	29
3.3.1. Čvrstoća drva.....	30
3.3.2. Tvrdća drva	33
3.3.3. Modul elastičnosti	36
3.3.4. Brzina zvuka.....	37
3.4. Otpornost na trošenje.....	38
3.5. Trajnost drva.....	39
3.6. Toplinska svojstva drva	40
3.6.1. Toplinska vodljivost.....	40
3.6.2. Zapaljivost i gorivost.....	41
3.7. Estetska svojstva drva.....	42

3.7.1.	Boja drva	43
3.7.2.	Tekstura drva.....	43
3.7.3.	Sjaj drva.....	44
3.7.4.	Miris drva	44
4.	EKSPERIMENTALNI DIO.....	46
4.1.	Cilj rada i provođenje ispitivanja.....	46
4.2.	Materijal za ispitivanje	46
4.3.	Analiza makro i mikro strukture.....	47
4.3.1.	Priprema uzorka	48
4.3.1.1.	Izrezivanje.....	48
4.3.1.2.	Postavljanje na predmetno staklo.....	48
4.3.2.	Rezultati analize makro i mikro strukture	49
4.3.2.1.	Analiza makro i mikro strukture prstenasto poroznih listića	50
4.3.2.2.	Analiza makro i mikro strukture difuzno poroznih listića.....	54
4.3.2.3.	Analiza makro i mikro strukture četinjača	55
4.4.	Određivanje gustoće drva	60
4.5.	Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje	62
4.5.1.	Provođenje ispitivanja.....	64
4.5.2.	Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje.....	65
4.5.2.1.	Prstenasto porozne listiće	68
4.5.2.2.	Difuzno porozne listiće	70
4.5.2.3.	Otpornost četinjača na abrazijsko trošenje	71
5.	ANALIZA REZULTATA.....	74
5.1.	Osvrt na analizu strukture.....	74
5.2.	Osvrt na rezultate mjerenja gustoće drva	74
5.3.	Osvrt na rezultate abrazijskog trošenja.....	75
6.	ZAKLJUČAK	78
	LITERATURA.....	79

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Četinjače i listače [4].....	9
Slika 2.2. Karakteristični presjeci drva [4].....	10
Slika 2.3. Poprečni presjek kroz deblo s makroskopskim elementima građe [7].....	11
Slika 2.4. Poprečni presjek kroz drvo [1].....	12
Slika 2.5. Razlika između normalnog, prekinutog i lažnog goda [6].....	13
Slika 2.6. Promjene u makroskopskoj građi uzrokovane promjenom vanjskih uvjeta [9].....	13
Slika 2.7. Tipovi godova [1].....	14
Slika 2.8. Razlika godova u boji i širini [1]	14
Slika 2.9. Poprečni presjek kroz drvo četinjače (lijevo) i listače (desno) [1]	15
Slika 2.10. Model stijenke traheida četinjača [1]	16
Slika 2.11. Struktura jednostavnih i omeđenih jažica [10]	16
Slika 2.12. Struktura golosjemenjača [1]	17
Slika 2.13. Drvni traci s jednim i više redova stanica (tangencijalni presjek) [12]	18
Slika 2.14. Aksijalna smolenica bora (poprečni presjek) [13]	18
Slika 2.15. Struktura listača [14].....	19
Slika 2.16. Vlakanca (v) i parehimske stanice (ph) u drvu hrasta (<i>Quercus rubra</i>) [4].....	19
Slika 2.17. Drvni traci [4].....	20
Slika 2.18. Celuloza [15].....	21
Slika 2.19. Hemiceluloza [5].....	21
Slika 2.20. Moguća struktura lignina [5].....	22
Slika 2.21. Prosječni kemijski sastav četinjača i listača [7]	22
Slika 3.1. Stereometrijska metoda određivanja volumena [1]	26
Slika 3.2. Utjecaj anizotropnosti drvene građe na utezanje [24]	28
Slika 3.3. Omjer između tlačne čvrstoće u smjeru vlakancata i gustoće u prosušenom stanju [30]	30
Slika 3.4. Utjecaj usmjerenosti strukture na tlačnu i vlačnu čvrstoću [8].....	31
Slika 3.5. Utjecaj vlage na čvrstoću drva [8]	31
Slika 3.6. Položaj godova u odnosu na smjer savojne sile [4]	32
Slika 3.7. Razlika između mjerenja poprečne i bočne tvrdoće [31].....	33
Slika 3.8. Ispitivanje tvrdoće metodom po Janki [4].....	34
Slika 3.9. Shematski prikaz mjerenja tvrdoće po Brinellu [4]	35
Slika 3.10. Specifična krutost drva i drugih tehničkih materijala [33]	37
Slika 3.11. Utjecaj poroznosti na brzinu zvuka u poprečnom smjeru [35]	38

Slika 3.12. Osnovne osi simetrije i osnovni presjeci u drvu (P, R, T) [4].....	39
Slika 3.13. Drveni dvorac star preko 1300 godina (Nara, Japan) [1].....	40
Slika 3.14. Slojevi nastali pri izgaranju drva [4].....	41
Slika 3.15. Drveni i čelični nosači nakon požara [4]	42
Slika 3.16. Tekstura radijalnog (lijevo), tangencijalnog (sredina) i poprečnog (desno) presjeka drva [40]	44
Slika 4.1. Uzorak za ispitivanje mikrostrukture i otpornosti na abrazijsko trošenje.....	47
Slika 4.2. Uzorak za određivanje makrostrukture i gustoće	47
Slika 4.3. Izrezivanje uzoraka za ispitivanje mikrostrukture	48
Slika 4.4. Histološki preparat	49
Slika 4.5. Svjetlosni mikroskop OLYMPUS BX51	49
Slika 4.6. Makrostruktura poprečnog presjeka hrasta	50
Slika 4.7. Mikrostruktura poprečnog presjeka hrasta.....	51
Slika 4.8. Makrostruktura poprečnog presjeka jasena.....	52
Slika 4.9. Mikrostrukutra poprečnog presjeka jasena	52
Slika 4.10. Mikrostruktura poprečnog presjeka trešnje.....	53
Slika 4.11. Makrostruktura lipe.....	54
Slika 4.12. Mikrostruktura poprečnog presjeka lipe	55
Slika 4.13. Makrostruktura poprečnog presjeka jele.....	56
Slika 4.14. Mikrostruktura poprečnog presjeka jele	56
Slika 4.15. Površina poprečnog presjeka smreke	57
Slika 4.16. Mikrostruktura poprečnog presjeka smreke s uočljivim prijelazima između godova	58
Slika 4.17. Površina poprečnog presjeka ariša	59
Slika 4.18. Mikrstruktura poprečnog presjeka ariša.....	59
Slika 4.19. Mjerenja dimenzija uzorka za određivanje gustoće	60
Slika 4.20. Mjerna vaga „Metler B5C 1000“	61
Slika 4.21. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje na uređaju „Taber abrader“	62
Slika 4.22. Uzorci hrasta za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje	63
Slika 4.23. Uzorci jasena za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje	63
Slika 4.24. Uzorci trešnje za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje.....	63
Slika 4.25. Uzorci lipe za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje	63
Slika 4.26. Uzorci jele za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje.....	64
Slika 4.27. Uzorci smreke za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje	64
Slika 4.28. Uzorci ariša za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje	64
Slika 4.29. Intenzitet trošenja drva na brusnom papiru P60.....	65

Slika 4.30. Intenzitet trošenja drva na brusnom papiru P80.....	66
Slika 4.31. Intenzitet trošenja drva na brusnom papiru P100.....	66
Slika 4.32. Intenzitet trošenja drva na brusnom papiru P150.....	67
Slika 4.33. Intenzitet trošenja drva na brusnom papiru P240.....	67
Slika 4.34. Intenzitet trošenja drva na brusnom papiru P320.....	68
Slika 4.35. Intenzitet trošenja drva na brusnom papiru P800.....	68
Slika 4.36. Ovisnost intenziteta trošenja o prosječnoj veličini abrazivnih čestica za prstenasto porozne listače.....	70
Slika 4.37. Ovisnost intenziteta trošenja o prosječnoj veličini abrazivnih čestica za lipu.....	71
Slika 4.38. Ovisnost intenziteta trošenja o prosječnoj veličini abrazivnih čestica za skupinu četinjača.....	73
Slika 5.1. Utjecaj gustoće drva listača na intenzitet abrazijskog trošenja.....	75
Slika 5.2. Utjecaj gustoće drva četinjača na intenzitet abrazijskog trošenja.....	76
Slika 5.3. Utjecaj veličine abrazivnog zrna na intenzitet trošenja listača	77
Slika 5.4. Utjecaj veličine abrazivnog zrna na intenzitet trošenja četinjača	77

POPIS TABLICA

Tablica 3.1. Gustoća domaćih vrsta (udio vlage od 12 do 15%) [19].....	25
Tablica 3.2. Vrijednosti savojne i smične čvrstoće nekih vrsta drva [8, 21]	33
Tablica 3.3. Prosječne vrijednosti tlačne čvrstoće domaćih vrsta drva [8]	33
Tablica 3.4. Jankova skala za tvrdoću drva [30]	36
Tablica 3.5. Vrijednosti modula elastičnosti nekih domaćih vrsta drva [32].....	37
Tablica 3.6. Vrijednosti toplinske vodljivosti drva i drugih materijala [4].....	41
Tablica 3.7. Domaće vrste drva u ovisnosti o jakosti sjaja [1].....	44
Tablica 4.1. Gustoća ispitnih materijala.....	61
Tablica 4.2. Prosječna veličina abrazivnih čestica brusnih papira	65
Tablica 4.3. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za hrast	69
Tablica 4.4. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za jasen.....	69
Tablica 4.5. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za trešnju	69
Tablica 4.6. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za lipu.....	71
Tablica 4.7. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za jelu	72
Tablica 4.8. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za smreku	72
Tablica 4.9. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za ariš	72

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
k		koeficijent kvalitete materijala
F	N/mm^2	sila
R_m	N/mm^2	vlačna čvrstoća
R_{ms}	N/mm^2	savojna čvrstoća
R_{mt}	N/mm^2	smična čvrstoća
E	N/mm^2	modul elastičnosti
ρ	g/cm^3	gustoća
ρ_w	g/cm^3	gustoća drva pri određenom udjelu vlage
ρ_{12}	g/cm^3	gustoća drva pri udjelu vlage od 12%
ρ_0	g/cm^3	gustoća drva u apsolutno suhom stanju
ρ_s	g/cm^3	gustoća drvne tvari
M	%	udio vlage u drvu
ε_u	mm/mm	istezanje
f_p	N/mm^2	tlačna čvrstoća
H_j	N	tvrdoća metodom po Janki
HB	N/mm^2	tvrdoća metodom po Brinellu
V	m/s	brzina zvuka
m	g	masa uzorka
Δm_1	g	gubitak mase nakon 50 okretaja
Δm_2	g	gubitak mase između 50 i 100 okretaja
Δm_3	g	gubitak mase između 100 i 150 okretaja
Δm	g	aritmetička sredina gubitka mase
V	mm^3	volumen uzorka
a	mm	duljina poprečnog presjeka uzorka
b	mm	širina poprečnog presjeka uzorka
μ	%	relativna vlažnost drva
α	%	poroznost
ρ	g/cm^3	gustoća drva
D	μm	prosječna veličina abrazivnih čestica
$V/(a*b)$	mm^3/mm^2	intenzitet trošenja

SAŽETAK

Cilj ovog rada bio je utvrditi utjecaj strukture i gustoće drva na otpornost prema abrazijskom trošenju te utjecaj veličine abrazivnih čestica na intenzitet trošenja. Analizirane vrste drva su: hrast, jasen, lipa, trešnja, jela, smreka i ariš.

Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu opisana je struktura drva od makro do molekularne razine i opisana su mehanička, fizikalna i estetska svojstva.

U eksperimentalnom dijelu prikazani su rezultati ispitivanja dobiveni analizom makro i mikro strukture, mjerenjem gustoće te rezultati dobiveni mjerenjem otpornosti na abrazijsko trošenje.

Hrast, jasen i trešnja pripadaju prstenasto poroznim, a lipa difuzno poroznim listačama. Jela, smreka i ariš pripadaju skupini četinjača i ne sadrže velike provodne sudove - pore.

Izmjerene vrijednosti za gustoću pokazuju kako četinjače imaju nižu gustoću od listača. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je na uređaju s rotirajućim diskom, na brusnim papirima različite granulacije. Pokazalo se da gustoća i poroznost te veličina i raspored pora znatno utječu na intenzitet trošenja. Veličina abrazivnih čestica također utječe na intenzitet trošenja, na vrlo specifičan način.

KLJUČNE RIJEČI: drvo, makro i mikro struktura, abrazijska otpornost

SUMMARY:

The aim of this paper was to determine the influence of wood structure and density on abrasion resistance and the influence of abrasive particle size on the wear intensity. The analyzed types of wood are: oak, ash, cherry, lime, fir, spruce and larch.

The work consists of theoretical and experimental part.

In the theoretical part, wood structure from macro to molecular level and mechanical, physical as well as aesthetic properties are described.

In the experimental part, the results of tests obtained by analyzing macro and micro structure, measuring the density and results obtained by measuring abrasive wear resistance, are showed.

Oak, ash, cherry belong to the ring-porous, lime to the diffuse-porous hardwood. Fir, spruce and larch belong to softwood and do not contain large vessels – pores. Measured density values show that softwoods have lower densities than hardwoods. Abrasive wear resistance test was carried out on the pin-on-disc machine where the abrasive clothes of different granulation were used. It has been shown that the density, porosity, size and arrangement of pores significantly influence the wear intensity. The size of the abrasive particles also affects the wear intensity, in a very specific way.

KEY WORDS: Wood, macro and micro structure, abrasion resistance

1. UVOD

Šuma je savršena ekološka tvornica u kojoj se uvjeti rada mijenjaju iz dana u dan s obzirom na varijable iz okoliša. Drvo, kao glavni proizvod te tvornice, raste samo uz pomoć sunčeve energije i uvijek je dostupno. Drvo je prirodni, ekološki i biorazgrađivi materijal koji se koristi od početka ljudske civilizacije i nikada nije izgubilo popularnost. U ranoj ljudskoj povijesti drvo je, uz kamen i glinu, bilo najvažniji materijal, a danas se najviše koristi kao glavni izvor energije za više od polovice svjetske populacije te kao tehnički materijal. U usporedbi s procesom proizvodnje i obrade drugih sirovina, drvo zahtijeva minimalan utrošak energije, posjeduje sposobnost prirodnog vezivanja štetnog CO₂ i sposobnost proizvodnje kisika. Sve to s obzirom na vrlo visoke ekološke norme i zahtjeve današnjice, stavlja drvo na prvo mjesto kad je riječ o izboru materijala i uvijek je dobro izabrana alternativa. Za razliku od svojstava drugih tehničkih materijala, drvo ima specifična fizikalna, kemijska, mehanička i tehnološka svojstva. To je materijal koji se samostalno i prirodno obnavlja, ono je čvrsto i kruto, a u usporedbi s materijalom poput čelika, također je lagano i fleksibilno. Njegova primjena u građevinarstvu i celuloznoj industriji općenito je poznata, a napretkom tehnologije područje njegove primjene još se više proširilo. Za neke aplikacije, na primjer za podove i stepenice, otpornost drva na abrazijsko trošenje je vrlo važna. Mnogobrojne su prednosti drva koje ga čine ravnopravnim s ostalim tehničkim materijalima: mala težina elemenata, laka obrada, velika čvrstoća paralelno s vlaknima, mala osjetljivost na temperaturne promjene, velike mogućnosti oblikovanja, dobre mogućnosti montaže i transporta konstrukcijskih elemenata. Naravno, greške u drvu, osjetljivost na biotske i abiotske razgrađivače, usmjerenost građe i svojstava, ovisnost mehaničkih osobina o sadržaju vlage u drvu, skupljanje i bubrenje te zapaljivost su prirodni nedostaci koje je moguće različitim postupcima svesti na minimum. [1, 2, 3]

Kako bi se analizirao utjecaj mikrostrukture na abrazijska svojstva drva, u ovom radu su korišteni uzorci izrezani iz sedam vrsta drva: *hrasta*, *jasena*, *lipe*, *trešnje*, *jele*, *smreke* i *ariša*. Navedene vrste se razlikuju po mikrostrukтури u poprečnom presjeku. Osim ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje na njima je analizirana makro i mikro struktura te određena gustoća.

Iz literature je poznato da veličina abrazivnog zrna dosta utječe na otpornost abrazivskom trošenju pa je ispitivanje provedeno na brusnim papirima s različitom finoćom abrazivnih čestica.

2. STRUKTURA DRVA

Drvo je prirodni kompozitni materijal koji se dobiva od drvenastih, vaskularnih i višegodišnjih biljaka, koje imaju razvijeno trajno stablo, a građene su od sekundarnog tkiva. Struktura drva može se promatrati na nekoliko razina.

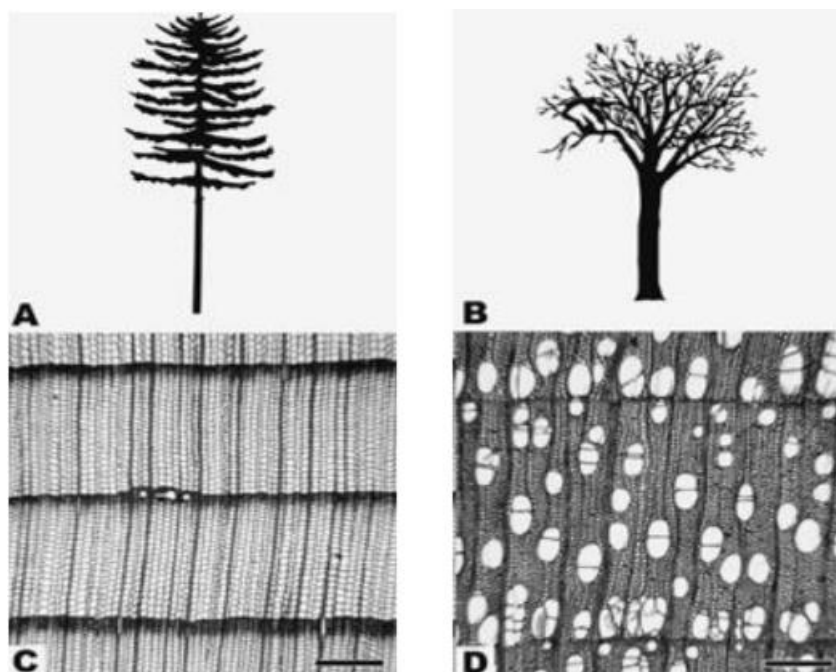
Osnovna je molekularna razina na kojoj se drvo može promatrati kao skup različitih biopolimera, koji su u najvećem dijelu umreženi lanci celuloze i hemiceluloze povezani ligninom.

Na razini mikrostrukture osnovna gradbena jedinica drva je drvna stanica sastavljena od lumena i stanične stijenke.

Kad se govori o makrostrukтури drva, promatraju se različiti slojevi na karakterističnim presjecima – kora, srževina, bjeljika, godovi, ... [1]

2.1. Botanička podjela

Sve komercijalno zanimljive vrste drva pripadaju skupini cvjetnica ili sjemenjača, a dijele se na listače i četinjače, slika 2.1. Drvo četinjača zove se još i meko drvo (engl. softwood), a drvo listača tvrdo drvo (engl. hardwood), iako to nema uvijek veze s njihovom stvarnom tvrdoćom.



Slika 2.1. Četinjače i listače [4]

Opći oblik stabla četinjača (A) i listača (B)

Poprečni presjek kroz deblo četinjača (C) i listača (D)

Četinjače ili **golosjemenjače** su dobile ime po obliku listova, rastu u umjerenim klimatskim pojasevima i uglavnom su zimzelene (zimi ne gube lišće). Malobrojne su po porodicama, nema puno vrsta, a kod nas su najpoznatije jela (*Abies*), smreka (*Picea*) i bor (*Pinus*).

Listače ili **kritosjemenjače** su poznate još pod nazivom bjelogorica. Većina vrsta listača raste u tropskom klimatskom pojasu i za razliku od četinjača, zastupljene su s oko 30 porodica i 2000 vrsta. Njima u jesen lišće opada, a tipični predstavnici su bukva (*Fagus*), hrast (*Quercus*), jasen (*Fraxinus*) i dr. [1, 4]

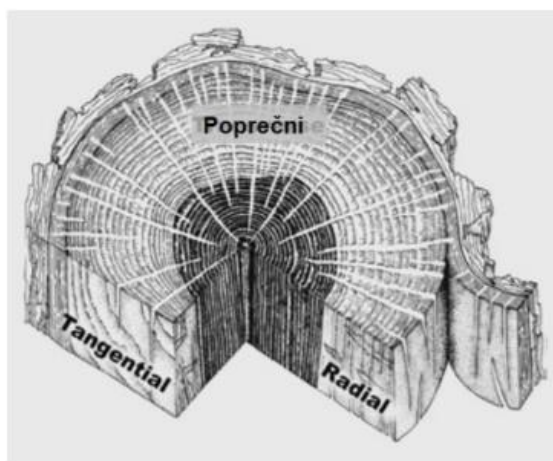
2.2. Makrostruktura drva

Najveći dio mase drveta čini deblo. Stablo se može podijeliti na podzemni i nadzemni dio. Podzemni dio je korijen koji uzima vodu i hranjive tvari, skladišti ih i time opskrbljuje nadzemni dio koji se sastoji od debla, grana i lišća.

Razlikuje se primarni i sekundarni rast drveta. Primarni rast se odnosi na rast vegetacijskog vrha, dok sekundarni rast traje čitavog života biljke i to je rast u debljinu. Ksilem koji nastaje sekundarnim rastom naziva se drvo. [1, 5]

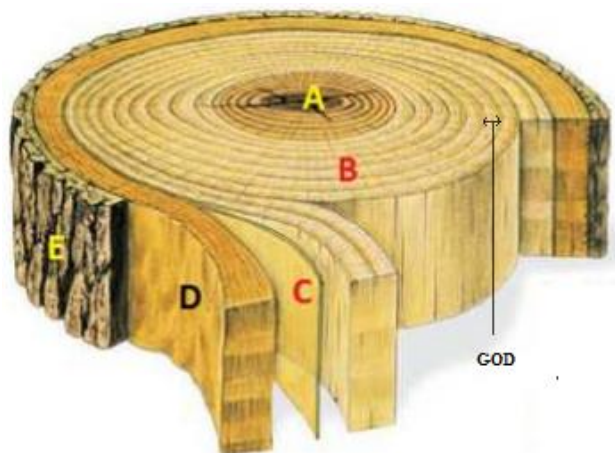
Makroskopske karakteristike drva posljedica su nehomogene i različite građe drva u histološkom smislu. Makroskopska građa drva može se uočiti na svakom njegovom presjeku bez obzira na orijentaciju reza i način obradbe. Budući da je drvo valjkasto tijelo s centralnom uzdužnom osi simetrije, za potpuno definiranje građe drva koriste se tri karakteristična presjeka (slika 2.2), a to su: [6]

- **POPREČNI** – okomit na uzdužnu os biljnog valjka
- **RADIJALNI** – u ravnini određenoj polumjerom i osi valjka drva (uzdužno kroz srce)
- **TANGENCIJALNI** – okomit na polumjer valjka drva i uzdužno paralelan sa srcem



Slika 2.2. Karakteristični presjeci drva [4]

Drvo je nehomogene građe, a različitost elemenata građe možemo uočiti na poprečnom presjeku debla. Makroskopski elementi građe drveta prikazani su na slici 2.3.



Slika 2.3. Poprečni presjek kroz deblo s makroskopskim elementima građe [7]

A – srčika i srževina, B – bjeljika, C – kambij, D – unutarnja kora, E – vanjska kora

U samom središtu drvnog valjka nalazi se **srčika**, ostatak tkiva iz rane faze rasta stabla dok deblo još nije bilo formirano. Građena je od specijalnih parenhimnih stanica manjeg promjera.

Srževinu čine odumrle stanice i nataložene različite biokemijske tvari koje se zovu ekstraktivi. Zbog njih je srževina tamnije obojena, a kondukcija vode i mineralnih tvari je onemogućena. O količini i vrsti ekstrahiranih tvari ovise mehanička i tehnološka svojstva te trajnost drva. U nekih se vrsta drva razlika u boji neosrženog i osrženog dijela ne vidi te se takve vrste nazivaju bakuljave (breza, jela, lipa i dr.), a kod nekih je srževina puno tamnija od bjeljike i te vrste se zovu jedričave (hrast, brijest, bagrem i dr.).

Bjeljika je živi sloj drva na području godova od srževine do kambija. Sastoji se od stanica koje provode vodu i mineralne tvari od korijena do vrhova izdanaka, ali osim transportne, imaju i funkciju skladištenja produkata fotosinteze.

Kambij je tanki sloj između unutarnje kore i bjeljike. Iz kambija svakog proljeća, u našoj klimatskoj zoni, kreće rast novog goda prema unutra (sekundarni ksilem), a prema vani novi sloj unutarnje kore (sekundarni floem). Odnos širine floema i ksilema jedne vegetacijske sezone je oko 1:10.

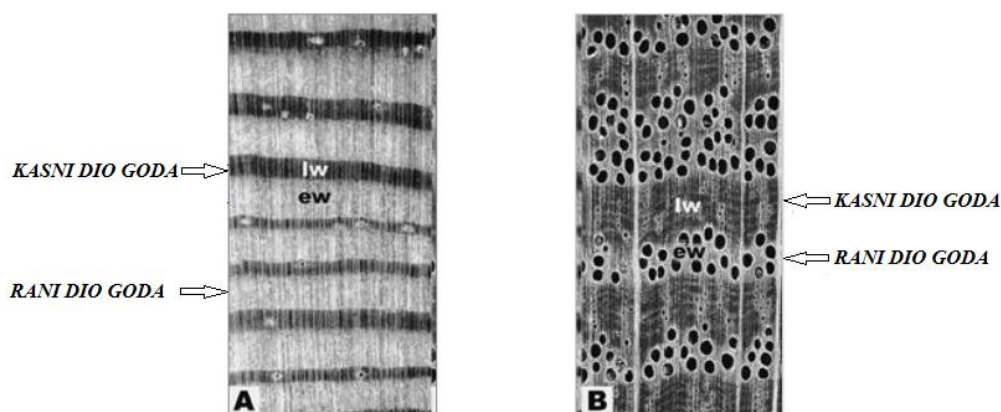
Unutarnja kora provodi organske tvari nastale u procesu fotosinteze od listova do korijena, dok **vanjska kora** ima ulogu mehaničke zaštite i sprječavanje gubitka vode iz stabla. [4, 5]

2.2.1. Godovi

Najuočljivija nehomogenost građe na poprečnom presjeku jest god ili godišnji prirast. Godovi su prsteni skupina stanica koje se koncentrično slažu oko srca drveta. Dok drvo raste, svake godine u njemu nastaje nova skupina stanica koja se u poprečnom presjeku vidi kao prsten. Preko broja prstena može se utvrditi starost stabla, iako to nije uvijek pouzdano, jer postoje vanjski utjecaji koji mogu poremetiti i prekinuti rast godova.

U radijalnom presjeku godovi se vide kao uže, a u tangencijalnom kao šire svjetlije trake paralelne sa srcem, međusobno odvojene tamnijom prugom koja odvaja god tekuće godine od goda naredne godine. [8]

Na slici 2.4. prikazan je poprečni presjek kroz drvo gdje se jasno vidi razlika između ranog i kasnog dijela goda kod četinjača i listača.

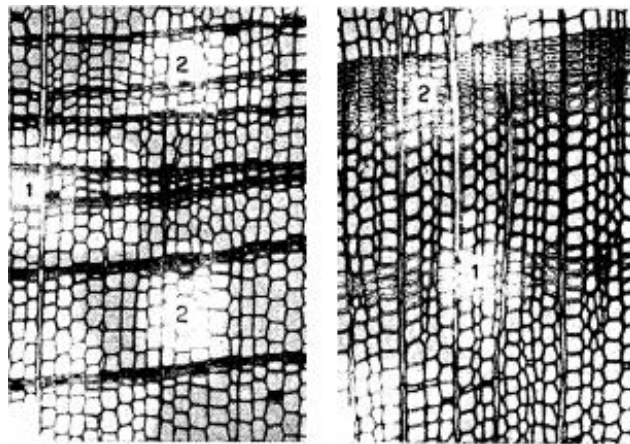


Slika 2.4. Poprečni presjek kroz drvo [1]

A – četinjače, B – listače

Prekinuti god nastaje ponajčešće potkraj života u stablima s asimetričnom i djelomično uginulom krošnjom. Zbog pomanjkanja hranjivih tvari, kambij ne proizvodi drvo po čitavu opsegu u jednoj ili više uzastopnih vegetacijskih sezona. Na takvim mjestima dolazi do spajanja godova. Nakon nekog vremena, prikriveni dijelovi kambija postaju aktivni te formiraju na tom mjestu neprekinut god. Lažni god nastaje zbog preranog formiranja zone kasnog drva unutar normalno građenog goda. Ta je zona obično uža i manje uočljiva nego normalni završetak goda. Zona kasnog drva lažnog goda je s obje strane opkoljena rjeđim staničjem ranog drva te ne formira prema van oštro omeđenu granicu goda. Takve nepravilnosti u građi goda zovu se dvostruki ili višestruki godovi. Oni se protežu neprekinuto po čitavu opsegu debla. Lažni godovi nastaju zbog poremećaja u fiziološkim procesima, koji mogu biti izazvani mrazom, poplavom, sušom ili abnormalnim produljenjem vegetacijske sezone do u kasnu jesen. Razlika između normalnog, prekinutog i

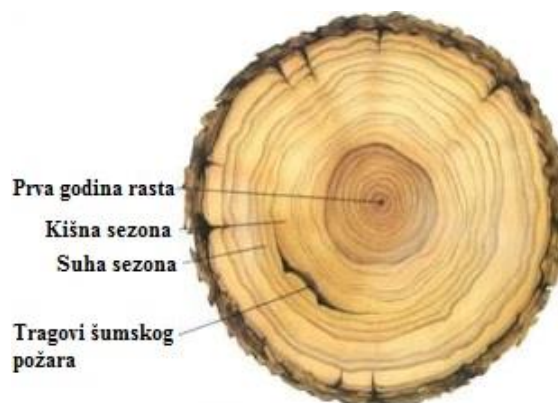
lažnog goda prikazana je na slici 2.5., dok su na slici 2.6. vidljive promjene u makroskopskoj građi drva uzrokovane promjenom vanjskih uvjeta. [6]



Slika 2.5. Razlika između normalnog, prekinutog i lažnog goda [6]

Lijevo – 1. prekinuti god, 2. normalni god

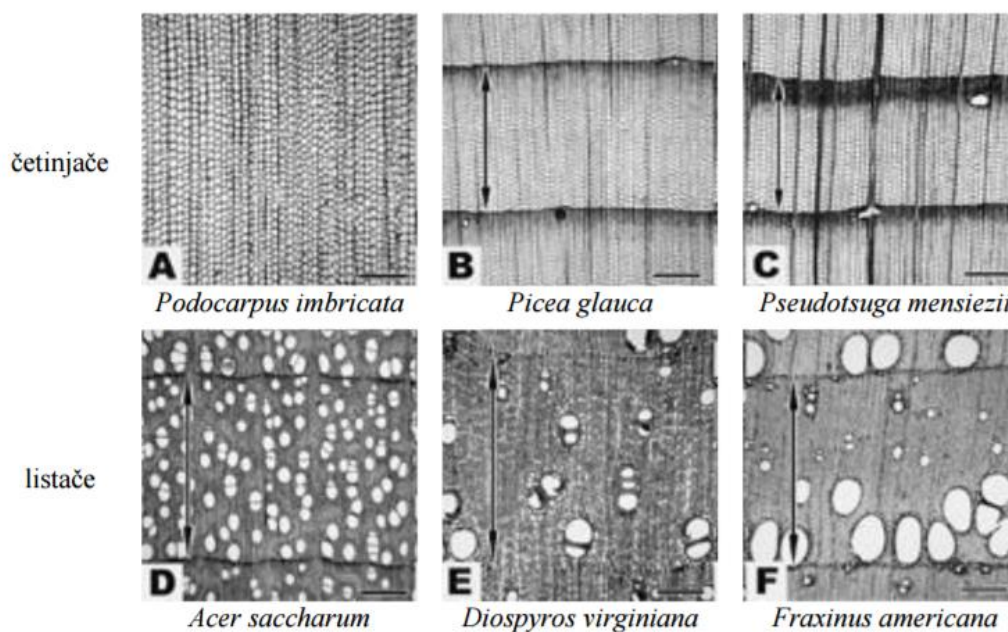
Desno – 1. lažni god, 2. kasno drvo normalnog završetka goda



Slika 2.6. Promjene u makroskopskoj građi uzrokovane promjenom vanjskih uvjeta [9]

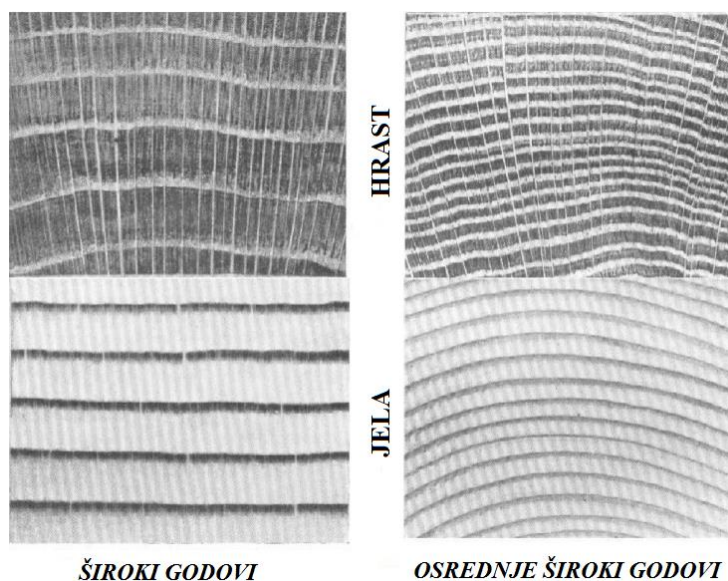
Godovi se razlikuju po:

- načinu rasporeda pora (slika 2.7.)
- stupnju markantnosti – markantniji su kod četinjača nego kod listača
- tijeku granične linije - paralelni s periferijom poprečnog presjeka debla
- širini – fini (do 1/3 cm), polufini (od 1/3 do 2/3 cm), grubi (širi od 2/3 cm)
- načinu nizanja - kod debala uglavnom širi u blizini srčike nego na periferiji
- boji – od najsvjetlijih do vrlo tamnih (slika 2.8.)



Slika 2.7. Tipovi godova [1]

- A – nema izraženih godova, B – postupan prijelaz iz ranog u kasno drvo,
 C – izražen prijelaz iz ranog u kasno drvo, D – difuzno porozno drvo
 E – semi-difuzno porozno drvo, F – prstenasto porozno drvo

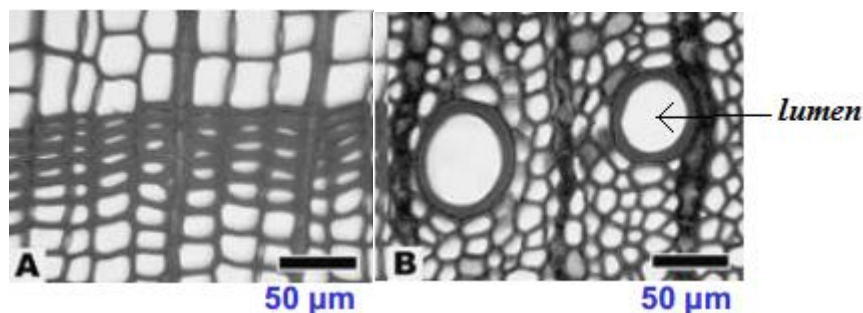


Slika 2.8. Razlika godova u boji i širini [1]

2.3. Stanična struktura drva

Staničnu strukturu drva definira posebna vrsta biljnih stanica. Svaka biljna stanica sastoji se od protoplasti (žive tvari okružene staničnom membranom) i stanične stijenke (nežive tvari izgrađene uglavnom od ugljikohidrata). Kad se govori o drvnoj stanici, misli se na mrtvu biljnu stanicu bez plazmatskog sadržaja. Prazni prostor omeđen staničnom stijenkom u kojem su se

prije nalazile protoplasti zove se lumen. Osnovna funkcija lumena je provođenje vode, a stanične stijenke da štiti stanicu od previsokog osmotskog tlaka i osigurava mehaničku potporu. Oblik stanice, debljina stijenke i veličina lumena razlikuju se kod četinjača i listača, a ta razlika je prikazana na slici 2.9.



Slika 2.9. Poprečni presjek kroz drvo četinjače (lijevo) i listače (desno) [1]

Kod četinjača su prisutne pravokutne stanice, sve istog tipa. Razliku se stanice s tankom stijenkom i relativno velikim lumenom te stanice s debeljom stijenkom i relativno malim lumenom.

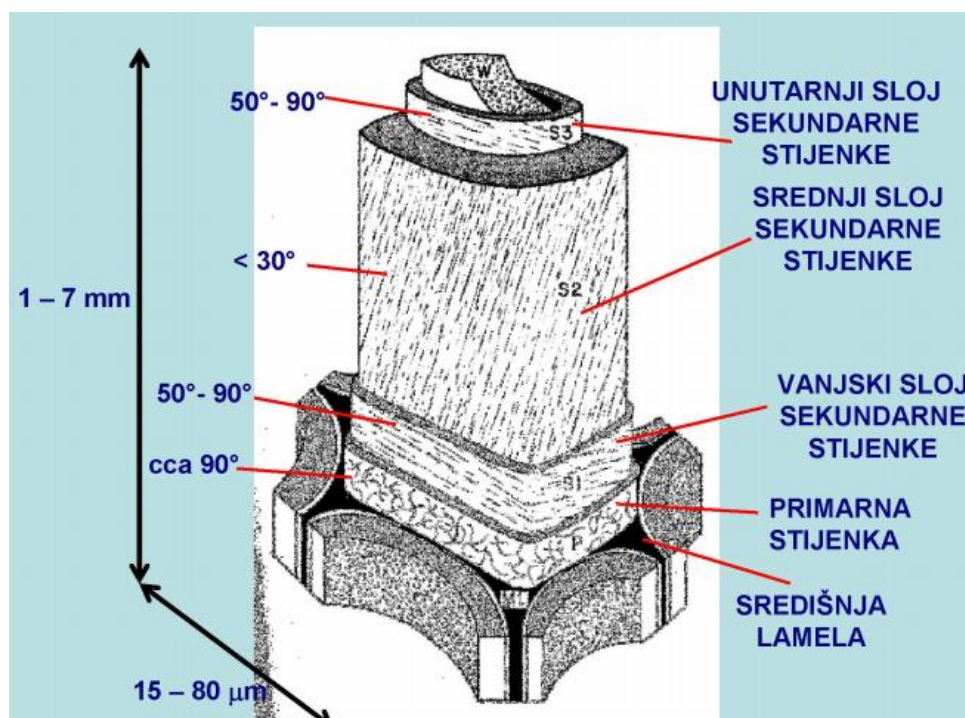
Kod listača, velike okrugle stanice imaju debelu stijenku i vrlo veliki lumen, dok ostale stanice imaju tanje stijenke i manje lumene. [1]

Stanična stijenka sastoji se od središnje lamele, primarne i sekundarne stijenke, kao što je prikazano na slici 2.10. Struktura svih dijelova je kompozitna, izgrađena od mikrovlakana celuloze i hemiceluloze okruženih matricom od lignina. Stanice su međusobno povezane središnjom lamelom. Na središnju lamelu nastavlja se tanki, primarni dio stijenke sačinjen od dugih mikrovlakana celuloze koja omataju stanicu pod kutom od 0 do 90° u odnosu na njezinu uzdužnu os. Na primarnu stijenku nastavlja se sekundarna, sastavljena od tri sloja različite debljine. U vanjskom sloju sekundarne stijenke celulozna mikrovlakna položena su pod kutem od 50 do 90° u odnosu na uzdužnu os stanice drveta. U srednjem sloju, ujedno i najdebljem, mikrovlakna celuloze položena su pod kutem od 5 do 30°, a udio lignina je manji nego u središnjoj lameli i primarnoj stijenci. Posljednji, unutarnji sloj sadrži još manje lignina, relativno je tanak, a mikrovlakna su omotana pod kutem većim od 70°. Lignin je hidrofobna tvar. Od središnje lamele prema lumenom njegov sadržaj se postupno smanjuje da bi se u živom drvu olakšao protok vode. U unutrašnjem sloju prevladavaju celuloza i hemiceluloza, koje su higroskopne, te je time olakšana funkcija transporta vode.

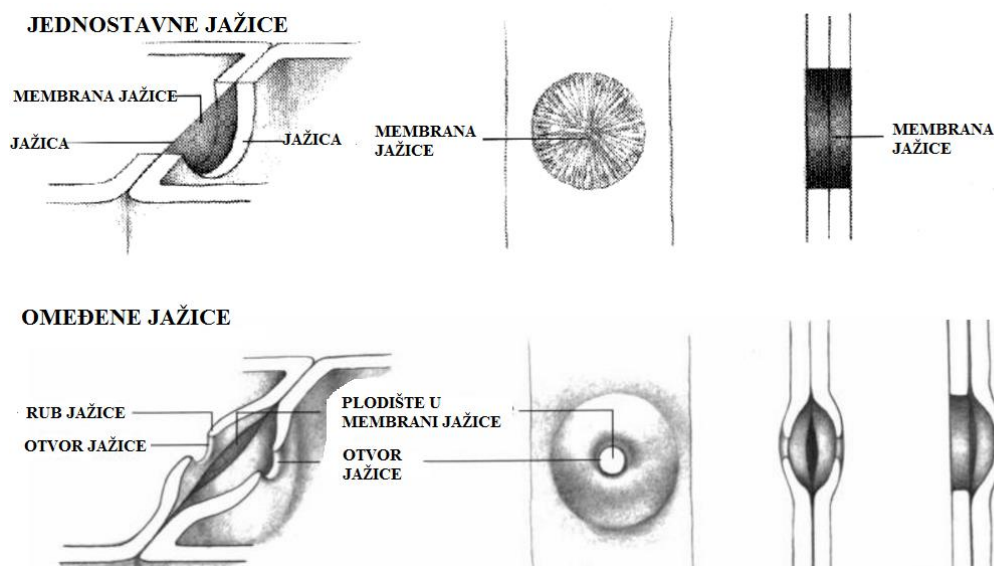
Funkcija međustanične komunikacije osigurana je posebnim strukturama unutar stanične stijenke - jažicama. Postoje dvije glavne vrste jažica - jednostavne i omeđene. Imaju dvije osnovne komponente, a to su šupljina i membrana. U jednostavnim jažicama, šupljina je gotovo

konstantne širine, dok se u omeđenim šupljina sužava prema staničnom lumenu. Membrana jažice sastoji se od primarne stanične stijenke i središnje lamele.

Struktura jednostavne i omeđene jažice je prikazana na slici 2.11. [5, 10]



Slika 2.10. Model stijenke traheida četinjača [1]



Slika 2.11. Struktura jednostavnih i omeđenih jažica [10]

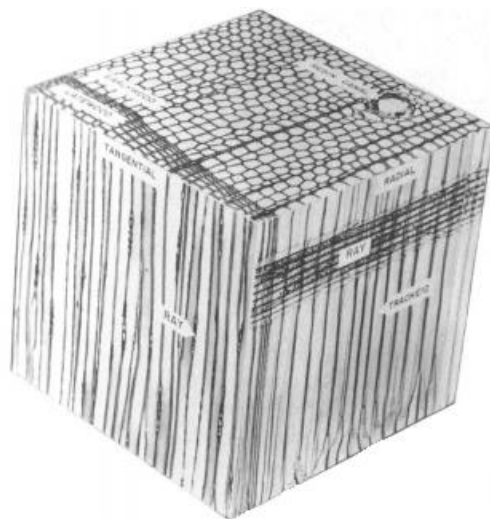
Između golosjemenjača (red četinjača, meko drvo) i kritosjemenjača (listače, tvrdo drvo) postoje razlike u strukturi. Četinjače su satkane od dvije vrste stanica i to od traheidnih i parenhimskih. U tkivu kombinacije tih dviju stanica nalaze se smolni kanali. Listače tvore četiri vrste stanica, a to su traheje, traheide, libriformne i paranhimske stanice. [11]

Kod golosjemenjača najzastupljenije stanice su aksijalne traheide, slika 2.12. Ove aksijalno orijentirane stanice čine od 90 do 95% zapremnine debla. Dužina im je oko sto puta veća od širine (3 mm do 4 mm prema 0,025 mm do 0,045 mm). Krajevi su zašiljeni, a u njima se nalaze spiralne granične pore, koje služe za provođenje vode. Osim aksijalnih traheida, prisutne su i radijalne traheide, koje imaju funkciju radijalnog transporta vode.

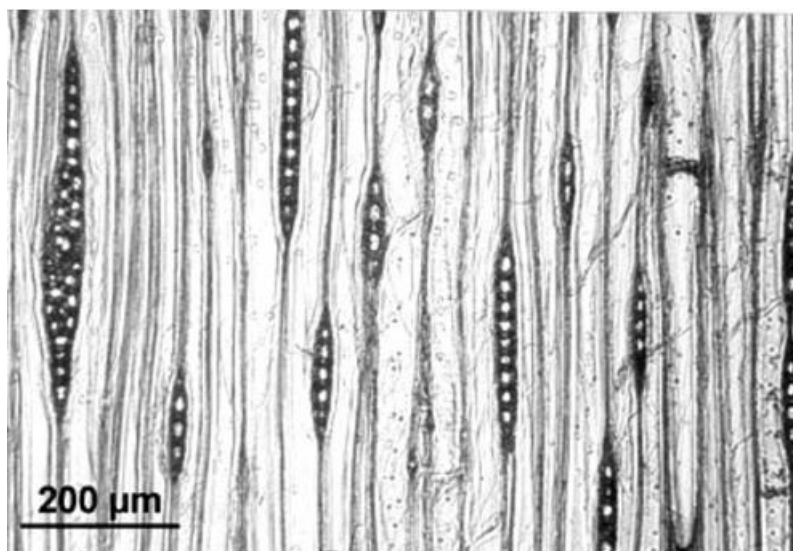
Drugu grupu stanica sačinjavaju parenhimske stanice, a mogu biti radijalne i aksijalne. Obično se mogu prepoznati kao tamnije obojeni snop stanica zbog nataloženih organskih tvari u lumenu, a njihov udio ne prelazi 1%. Kada se drveni traci promatraju u tangencijalnom presjeku vidi se da su uglavnom građeni od jednog reda stanica. Samo kod nekih vrsta nalazimo dvoredne ili troredne drvene trake, slika 2.13.

Radijalne parenhimske stanice grupiraju se u drvene trake, a povezuju centar debla s periferijom. Imaju funkciju provođenja vode i mineralnih tvari između ksilema i sekundarnog floema preko kambijskih stanica, akumulacije hranljivih tvari i razmjene plinova između ksilema i vanjske okoline. Kod četinjača drveni traci čine do 10% drva.

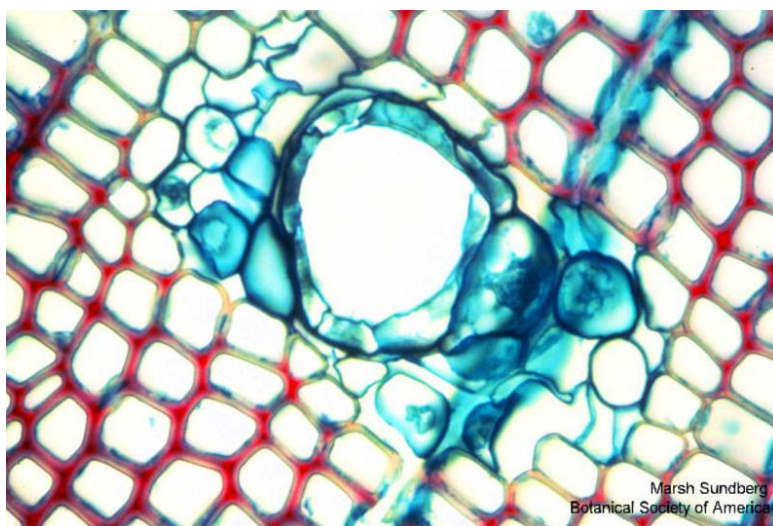
Neke vrste golosjemenjača (smreka, bor, ariš) imaju strukture koje se nazivaju smolnim kanalima ili smolenicama, slika 2.14. To su međustanični prostori omeđeni parenhimskim stanicama s tanjom ili debljom stijenkom. To su žive stanice koje proizvode smolu. Kanali mogu biti grupirani, a prostiru se u aksijalnom i radijalnom pravcu. Kod nekih vrsta se mogu javiti i traumatski smolni kanali koji su grupirani u tangencijalne nizove. [5]



Slika 2.12. Struktura golosjemenjača [1]



Slika 2.13. Drvni traci s jednim i više redova stanica (tangencijalni presjek) [12]

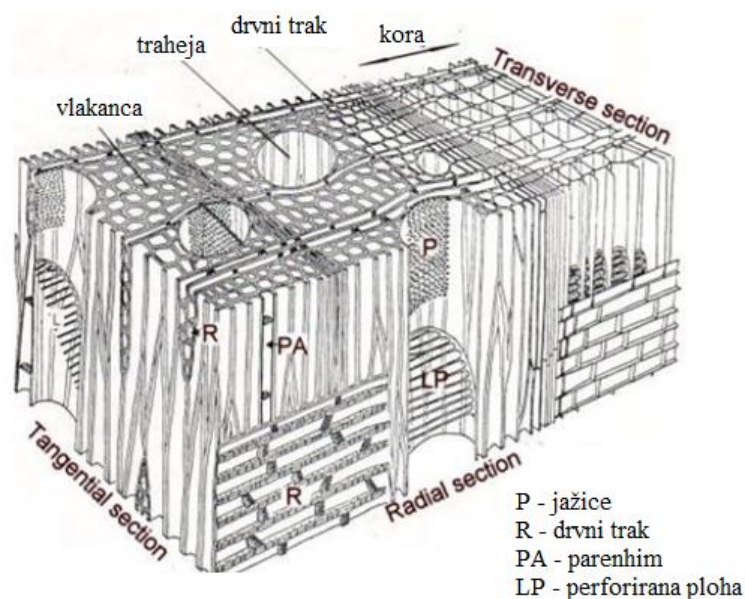


Slika 2.14. Aksijalna smolenica bora (poprečni presjek) [13]

Osnovne vrste stanica kod listača (kritosjemenjača) su traheje, vlakanca, aksijalni (longitudinalni) parenhim i drvni traci. Sve ove stanice imaju važnu biološku ulogu, a isto tako određuju mehanička, fizikalna, preradbena i druga svojstva drva.

Na slici 2.15. prikazana je mikrostruktura listača.

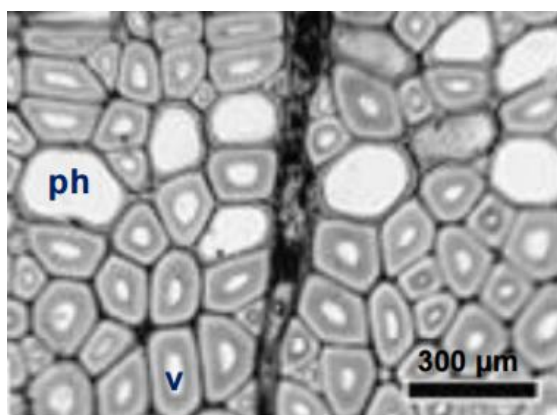
Glavnu razliku u odnosu na četinjače čini prisustvo **traheja** ili **pora** u strukturi listača. Traheje čine aksijalni niz stanica koje su spojene u cjevastu tvorevinu neodređene duljine. Nastavljaju se jedna na drugu i čine provodne sudove, čija je glavna funkcija provođenje velike količine vode i mineralnih tvari od korijena prema krošnji. Promjer traheja je između 15 i 350 μm, a duljina iznosi između 100 i 1200 μm. Traheje su međusobno spojene preko perforiranih površina.



Slika 2.15. Struktura listača [14]

Drvna vlakanca su stanice s debljom stijenkom i manjim lumenom od traheida. Njihova duljina je manja od duljine traheida i iznosi između 200 i 1200 μm . Njihova glavna uloga je mehanička potpora, a o debljini njihove stijenke ovise gustoća i čvrstoća svake pojedine vrste. Debljina stijenke varira u širokom rasponu, npr. od balze do javora, pa su različita i mehanička svojstva. Zbog malog lumena provodna funkcija kod vlakanaca gotovo da ne postoji.

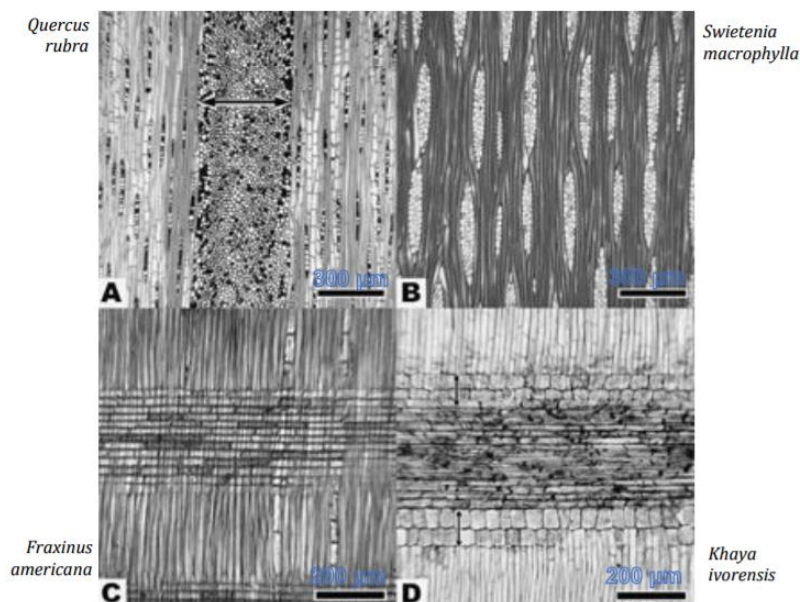
Aksijalne parenhimske stanice (slika 2.16.) imaju tanku stijenku i veliki lumen. Po građi i funkciji su iste kao kod četinjača kod kojih se rijetko pojavljuju, dok su kod listača uvijek prisutne. U aksijalnom sustavu nekih vrsta listača mogu se naći i traheide koje imaju provodnu i funkciju mehaničke potpore.

Slika 2.16. Vlakanca (v) i parenhimske stanice (ph) u drvu hrasta (*Quercus rubra*) [4]

Drveni traci se na poprečnom presjeku vide kao radijalne usmjerene trake od srčike prema kori. Kod listača su građeni isključivo od parenhimskih stanica i puno su raznolikiji nego kod

četinjača. Najčešće je njihova širina između jedne i pet stanica, a može biti i puno veća. Visina je najčešće do 1 mm.

Na slici 2.17. vide se drveni traci kod nekoliko različitih vrsta u tangencijalnom i radijalnom presjeku.



Slika 2.17. Drveni traci [4]

A i B tangencijalni, C i D radijalni presjek

2.4. Molekularna struktura drva

U kemijskom pogledu, na elementarnoj razini suha drvena tvar stanične stijenke se skoro u potpunosti sastoji od samo tri kemijska elementa:

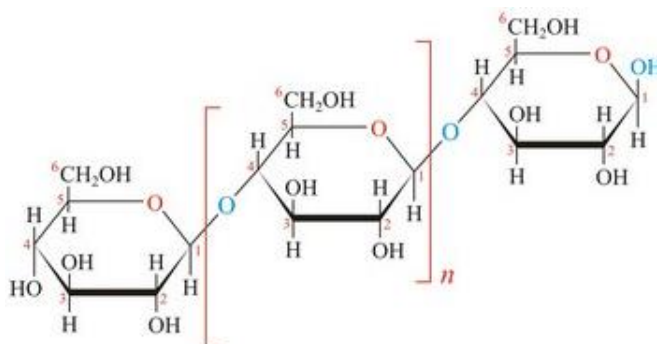
- ugljika, C – s masenim udjelom od oko 50%
- vodika, H – s masenim udjelom od oko 6%
- kisika, O – s masenim udjelom od oko 44%.

Od ugljika, vodika i kisika izgrađeni su celuloza, hemiceluloza i lignin. Umreženi i međusobno povezani lanci celuloze, hemiceluloze i lignina s nešto malo izlučevina i anorganskih tvari čine trodimenzionalni biopolimerni kompozit - drvo. [1]

Celuloza ($C_6H_{10}O_5$)_n je bijela vlaknasta tvar bez okusa i mirisa, netopljiva u vodi i organskim otapalima te je najrasprostranjeniji polisaharid na Zemlji. Sastavljena je od dugih nizova međusobno povezanih molekula glukoze (1→4)-β-glikozidnom vezom, kao što je prikazano na slici 2.18. Stupanj polimerizacije kod drvene celuloze može biti do 15 tisuća, a najčešće je oko 9 do 10 tisuća. U prirodi se celuloza primarno koristi kao strukturni materijal koji biljkama daje

karakterističnu čvrstoću i elastičnost. Teško se izolira iz drvene tvari jer je vrlo tijesno povezana s ligninom i hemicelulozom. [1, 15]

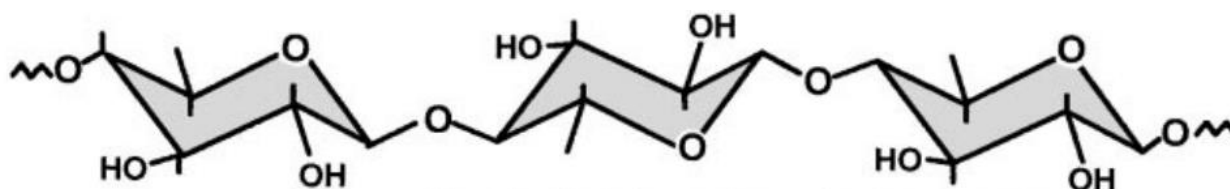
Celuloza čini između 40 i 45% mase drva.



Slika 2.18. Celuloza [15]

Hemiceluloza je razgranati polimer (slika 2.19.) koji sadrže više monomernih šećera, gdje su uz glukozu prisutne i ksiloza, galaktoza, manoza, ramnoza i arabinoza. Ima amorfnu strukturu i puno manji stupanj polimerizacije (10 – 200) od celuloze. Isto tako, osjetljivost na hidrolizu je veća nego kod celuloze. Ugrađena je u stanične stijenke biljaka tvoreći umrežena vlakna. [16]

Maseni udio hemiceluloze kod listača iznosi 19 i 26%, a kod četinjača se kreće od 7 i 14%.

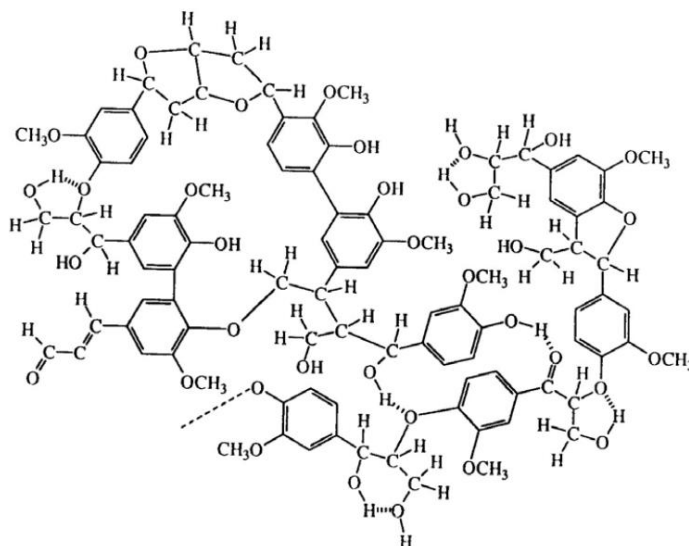


Slika 2.19. Hemiceluloza [5]

Lignin je visokokompleksni, amorfni, uglavnom aromatski polimer. Predstavlja matricu koja obavija celulozu i hemicelulozu koja je izgrađena od fenilpropanskih jedinica, a njegova osnovna uloga je povećanje krutosti i stabilnosti stanične stijenke.

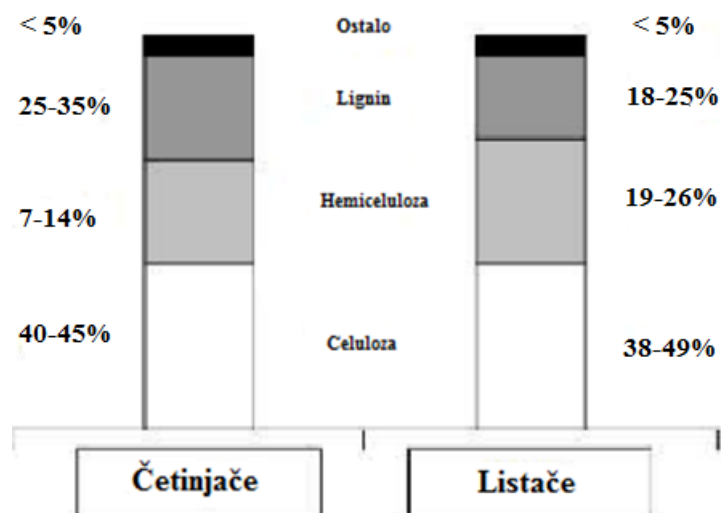
Maseni udio lignina kod četinjača iznosi između 25 i 35%, dok kod listača taj udio varira između 18 i 25%. [4, 5]

Moguća struktura lignina prikazana je na slici 2.20.



Slika 2.20. Moguća struktura lignina [5]

Prosječni kemijski sastav četinjača i listača prikazan je na slici 2.21.



Slika 2.21. Prosječni kemijski sastav četinjača i listača [7]

Osim celuloze i hemiceluloze u drvnjoj tvari četinjača i listača mogu se naći i neki drugi ugljikohidratni polimeri: **pektin**, **škrob** i **proteini**. Nalaze se u drvnjoj tvari kako četinjača tako i listača. Pektina u većoj koncentraciji nalazimo u staničnoj stijenci parenhimskih stanica unutarnje kore, a može se naći u središnjoj lameli i u membrani graničnih jažica. Škrob je osnovni rezervni polisaharid koji se nalazi u staničnoj stijenci u granulastim nakupinama.

Osim ugljikohidratnih polimera, u drvu se mogu naći **ekstrahirane** i **anorganske tvari**. Ekstrahirane tvari su prirodni produkti nastali ekstrakcijom iz biljnih sokova. Poznato je nekoliko stotina različitih ekstrakta od koji neki nastaju kao reakcija drva na različita oštećenja, a neki su prekursori za druge kemijske tvari. Sastoje se od masti, masnih kiselina,

fenola, terpentina, smola, voska i drugih tvari. Mogu se primjenjivati i u ljudskom životu, a jedan od primjera je smola koja se koristi u više namjena.

Udio anorganskih tvari u drvu se određuje mjerenjem mase pepela koji preostane nakon izgaranja drva na temperaturi od 575 ± 25 °C. Pepeo se sastoji od mineralnih soli i drugih anorganskih tvari, a njihov udio je manji od 0,5% kod većine vrsta. Apsorbirani su u obliku iona iz tla te preko korijena, debla i grana dospjeli u sve dijelove biljke. Neki od njih imaju važnu ulogu tijekom rasta drva. [4]

3. SVOJSTVA DRVA

Drvo kao građevni materijal brojne prednosti u odnosu na druge materijale. Osim što je prirodan građevinski materijal, drvo je lagano, postojano, vrlo dobrih mehaničkih karakteristika i u konačnosti ekonomski opravdan materijal. Mehaničke i fizikalne karakteristike bitne su kod izrade nosivih konstrukcijskih elemenata, ali drvo može biti iskorišteno i u svrhu uljepšavanja površina gdje su onda važnija estetska svojstva, koja se očituju bojom, sjajem i teksturom. [8, 17]

3.1. Gustoća drva

Gustoća drva je važno svojstvo, a predstavlja odnos između mase i volumena. Računa se prema formuli (1.1):

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ g/cm}^3 \quad (1.1)$$

gdje je:

- ρ – gustoća, g/cm^3
- m – masa uzorka, g
- V – volumen uzorka, cm^3 .

Gustoća drva ovisi o udjelu vlage u drvu pa se uz vrijednosti gustoće uvijek navode i udjeli vlage pri kojem je mjerena gustoća.

Gustoća drva pri nekom udjelu vlage (w) računa se prema izrazu (1.2):

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w}, \text{ g/cm}^3 \quad (1.2)$$

Preračunavanje vrijednosti gustoće drva pri nekom udjelu vlage na vrijednosti pri udjelu vlage od 12%, računa se prema izrazu (1.3):

$$\rho_{12} = \rho_w \frac{1+0,01(12-w)}{1+0,01(12-w) \times \frac{\rho_w}{\rho_{H_2O}}}, \text{ g/m}^3 \quad (1.3)$$

Gustoća drva u apsolutno suhom stanju određuje se prema izrazu (1.4):

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}, \text{ g/cm}^3 \quad (1.4)$$

Potpuna eliminacije vlage iz drva (apsolutno suho stanje) postiže se sušenjem u peći pri temperaturi od $103^\circ \pm 2^\circ \text{C}$ do konstantne mase.

Gustoća je usko povezana s fizikalnim i mehaničkim karakteristikama drva tako da povećanjem gustoće dolazi do porasta ogrjevne vrijednosti, porasta čvrstoće i tvrdoće, drvo se teže suši, impregnacija drva se teže izvodi i dr. Vrijednosti gustoće domaćih vrsta kreću se između 0,3 i 0,9 g/cm³, a na taj raspon osim vrste drva utječu građa drva, pozicija u stablu, stanište, udio celuloze, hemiceluloze i lignina i dr. [4, 18]

U tablici 3.1. prikazana je gustoća nekih domaćih vrsta pri udjelu vlage od 12 do 15%.

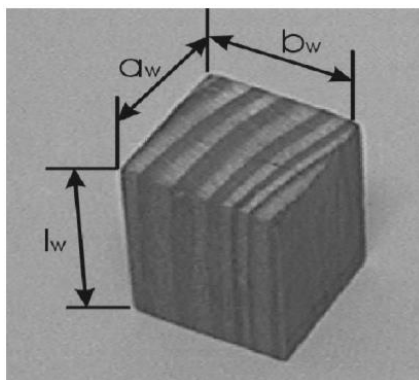
Tablica 3.1. Gustoća domaćih vrsta (udio vlage od 12 do 15%) [19]

Vrsta drva	Gustoća, g/cm ³
	min – srednja - max
hrast	0,43 – 0,69 – 0,96
jasen	0,45 – 0,69 – 0,86
lipa	0,35 – 0,53 – 0,60
trešnja	0,60 – 0,63 – 0,69
jela	0,35 – 0,45 – 0,75
smreka	0,33 – 0,47 – 0,68
ariš	0,44 – 0,59 – 0,85

Gustoću je moguće odrediti različitim metodama. Najčešće se koriste:

- standardna metoda
- metoda potapanja
- metoda plivanja
- optička metoda
- metoda x-zraka
- metoda β-zraka
- metoda γ-radijacije
- faktor gubitka energije.

Volumen uzorka drva može se odrediti stereometrijski i volumetriranjem. Sukladno normi ISO 13061 – 2:2014, stereometrijski način određivanja volumena uzorka obavlja se na uzorcima minimalnih dimenzija 20 x 20 x 20 mm. Na poprečnom presjeku ne smije biti manje od 5 godova, a dimenzije uzoraka mjere se napravom koja ima točnost 0,1 mm, a preciznost može varirati za $\pm 3\%$. Stereometrijski način određivanja volumena prikazan je na slici 3.1. [1, 20]



Slika 3.1. Stereometrijska metoda određivanja volumena [1]

Gustoća drva također je mjerilo za mogućnost upotrebe drva, ali je za precizniju ocjenu karakteristika i korisnosti drva potrebno poznavati i druge značajne karakteristike. Jedna od tih značajki je poroznost drva koja je u obrnutom razmjeru s gustoćom. Volumni udio pora računa se prema izrazu (1.5): [4]

$$\alpha = \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_s} \times 100 \quad (1.5)$$

gdje je:

- α – poroznost, %
- ρ – gustoća drva u apsolutno suhom stanju, g/cm^3
- ρ_s – gustoća drvene tvari, g/cm^3 .

Gustoća drvene tvari je zapravo gustoća stanične stijenke, ista je za sve vrste i u prosjeku iznosi $1,5 \text{ g/cm}^3$. [21]

Poroznost čini drvo bitno različitijim od homogenih materijala (metal, staklo i sl.). Ona je neophodna, jer se drvo u toku svog života izgrađuje kao živa supstanca u kojoj svuda moraju postojati prostori i šupljine radi njegovih životnih funkcija. [18]

3.2. Vлага u drvu

Živo drvo sadrži dovoljno vode da bi obavljalo svoju biološku funkciju, da se održi elastičnim i lakše izdrži udare vjetra i slično. Tehničko drvo je mrtvo drvo i primjenjuje se u prosušenom stanju. S promjenom količine vlage u drvu dolazi do promjena dimenzija, mehaničkih, toplinskih i drugih svojstava. [4]

Vlaga u drvu određena je udjelom vode u ukupnoj masi vlažnog drva te se sadržaj vlage u drvu izračunava prema izrazu (1.6):

$$M = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100, \% \quad (1.6)$$

gdje je:

M – sadržaj vlage u drvu, %

m_1 – masa drva kod nekog sadržaja vode, g

m_2 – masa drva nakon sušenja, g. [22]

Sadržaj vlage izražava se u % i zaokružuje na 1%.

Metode određivanja sadržaja vode u drvu:

1. *Direktne* – mjeri se masa ili volumen vode koja se na određeni način izdvoji iz drva
2. *Indirektne* – mjere se promjene nekog fizikalnog svojstva drva te na osnovi poznavanja odnosa sa sadržajem vode procjenjuje se indirektno sadržaj vode
3. *Higrometrijske* – mjeri se promjena nekog higroskopskog elementa [1]

Drvo je higroskopan materijal, što znači da će gotovo poput spužve, dobiti ili izgubiti vlagu iz zraka na temelju uvjeta iz okoline. Kada se stablo posiječe, smatra se da je u zelenom stanju i da sadrži relativno veliku količinu vlage.

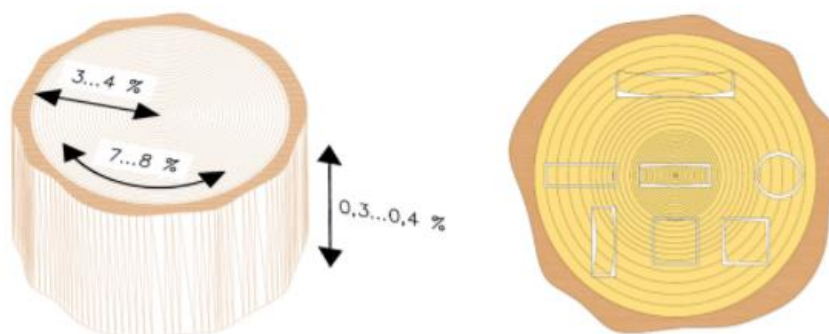
Voda se u drvu nalazi u dva oblika:

- kapilarna ili slobodna voda – voda u lumenima
- vezana voda – vezana vodikovom vezom za celulozu u stijenkama vlakana

Čim se drvo posiječe i ostavi na zraku počinje gubiti slobodnu vodu. Pri tom drvo ne mijenja dimenzije jer su vlakna još uvijek potpuno zasićena vezanom vodom. Jednom kada je izgubljena

sva slobodna voda, dosegnut će se **točka zasićenja vlakanaca**, koja iznosi između 25 i 35% vlage (u prosjeku se uzima 28%). Kada udio vlage u drvu padne ispod točke zasićenja vlakanaca, drvo gubi vlagu u obliku vezane vode i tad počinje utezanje drva, odnosno smanjenje njegovog volumena. U ovom trenutku, drvo više nije u *zelenom stanju*, već u stanju sušenja. [22, 23]

Kao posljedica smanjenja, odnosno povećanja higroskopske vode, dolazi do utezanja ili bubrenja drva na različite načine u radijalnom i tangencijalnom smjeru. Prilikom sušenja od potpuno mokrog do apsolutno suhog, drvo se uteže u tangencijalnom smjeru za prosječno 8%, u radijalnom smjeru za oko 4%, a u longitudinalnom smjeru samo za 0,2 - 0,4%, slika 3.2. (lijevo). Na istoj slici (desno) prikazane su promjene dimenzija i oblika uzoraka izrezanih iz različitih dijelova debla. [22, 23]



Slika 3.2. Utjecaj anizotropnosti drvene građe na utezanje [24]

Sušenje drva može se obaviti:

- *prirodnim putem* – sušenje se treba odvijati na otvorenom mjestu bez direktnog sunčevog svjetla, na dobro provjetrenom mjestu, uz povremeno polijevanje, kako bi se spriječilo naglo pucanje
- *umjetnim putem* – sušenje u sušarama je brže i kvalitetnije jer se proces sušenja odvija u idealnim uvjetima. Drvo se isušuje na temperaturi od $103^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$ kako bi se dostigla količina vlage od $\approx 0\%$. [7, 25]

Proces sušenja, osim što smanjuje masu drveta, dovodi do stabilizacije dimenzija, sprječava krivljenje i pucanje drva, štiti drvo od biološkog propadanja, povećava tvrdoću i čvrstoću drva i dr.[26]

3.3. Mehanička svojstva

Mehanička svojstva drva su skup karakteristika materijala koja dolaze do izražaja u uvjetima mehaničkog opterećenja, a važna su i kod prerade i kod uporabe materijala. [27]

Različite vrste drva imaju različita mehanička svojstva koja su posljedica anatomske građe drva. Postoje velike razlike u svojstvima i unutar iste vrste drva, ali i unutar istog debla, pa čak i unutar jednoga goda (npr. rano drvo ima 3 do 5 puta manju čvrstoću na tlak, vlak i savijanje od kasnoga drva u istome godu). Drvo korijena je manje čvrstoće od drva debla i grana, a drvo grana je, uz manje izuzetke, čvršće od drva debla. [28]

Mehanička svojstva drva ovise o:

- vrsti i građi drva
- gustoći drva
- smjeru vlaknaca
- sadržaju vode u drvu
- trajanju opterećenja
- temperaturi i vremenu uporabe. [29]

Kod izbora drva kao materijala za gradnju aviona, brodova, karoserija vozila i dr., velika se pažnja posvećuje odnosnu čvrstoće i gustoće drva. Općenito se kao koeficijent kvalitete nekog materijala uzima odnos nekog mehaničkog svojstva i njegove gustoće.

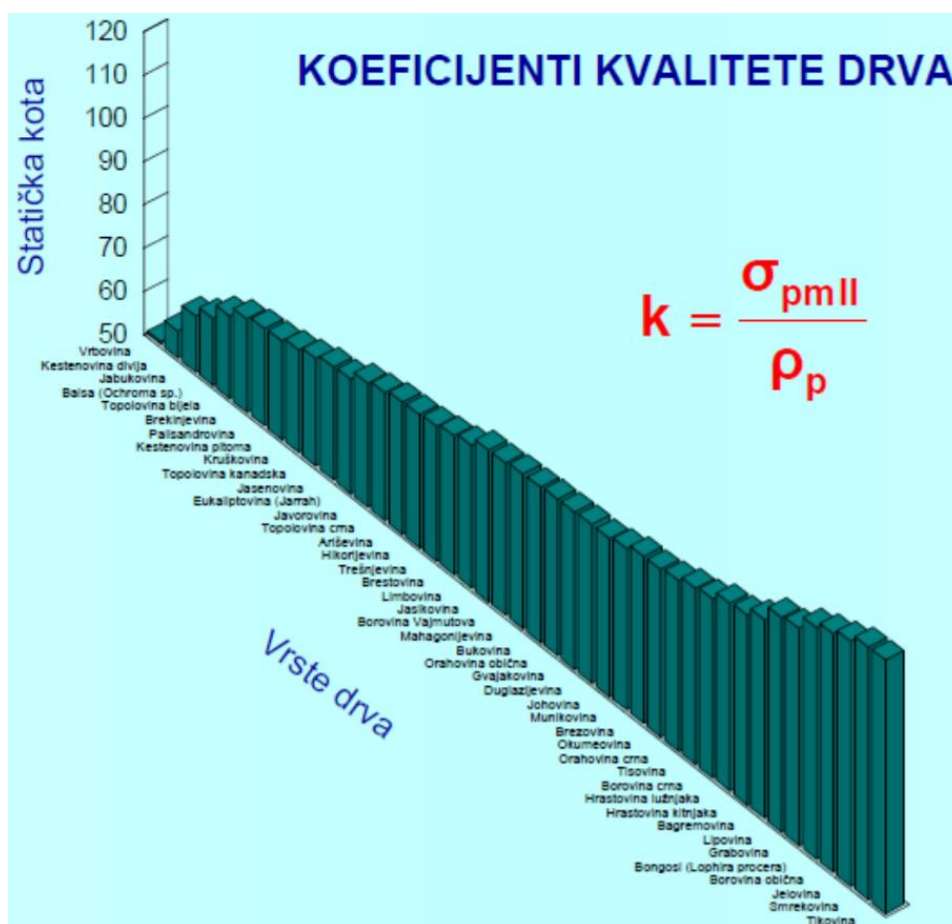
Tako se na primjer specifična vlačna čvrstoća računa prema izrazu (1.7):

$$k = \frac{R_m}{\rho} \quad (1.7)$$

gdje je:

- k - koeficijent kvalitete drva
- R_m - vlačna čvrstoća u N/mm^2
- ρ - gustoća u g/cm^3 .

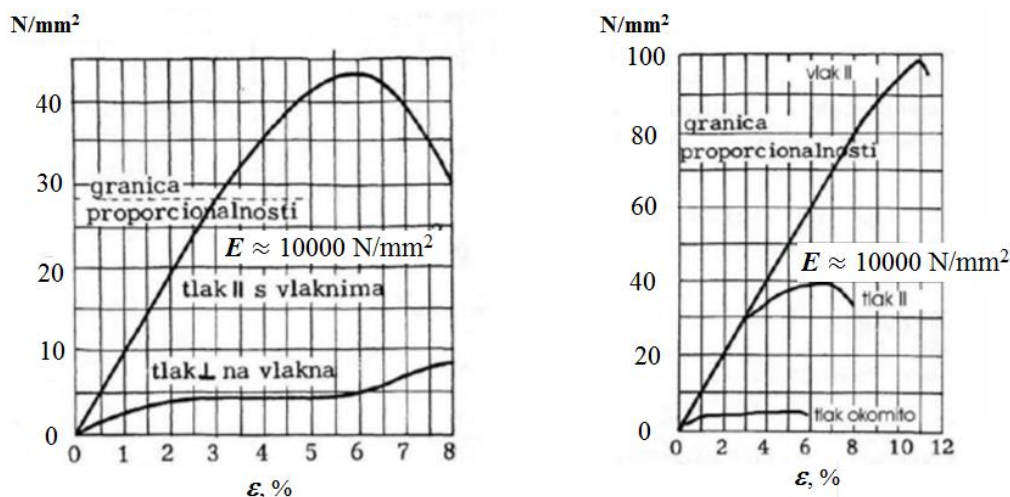
Na slici 3.3. prikazani su koeficijenti kvalitete drva pojedinih vrsta dobiveni omjerom tlačne čvrstoće u smjeru vlaknaca i gustoće u prosušenom stanju.



Slika 3.3. Omjer između tlačne čvrstoće u smjeru vlakanaca i gustoće u prosušenom stanju [30]

3.3.1. Čvrstoća drva

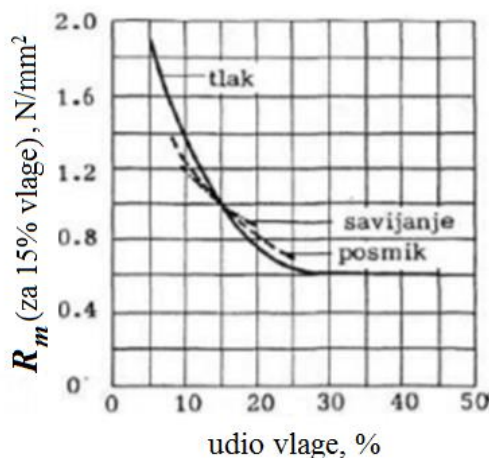
Čvrstoća drva je jedno od najvažnijih svojstava koje se traži u svakoj nosivoj konstrukciji. To je otpor kojim drvo nadvladava silu koja na njega djeluje tako da ga razvuče, stlači, savije, iskrene, slomi ili smrvi. Prema čvrstoći drva određuje se i njegova uporabna vrijednost. Čvrstoća drva u smjeru vlakanaca jako se razlikuje od čvrstoće okomito na vlakanca. Znatno višu čvrstoću pokazuje drvo opterećeno u smjeru vlakanaca nego okomito na njihov smjer, što prikazuje slika 3.4. [7, 28]



Slika 3.4. Utjecaj usmjerenosti strukture na tlačnu i vlačnu čvrstoću [8]

Tlačna čvrstoća dostiže samo do 50% vlačne čvrstoće u smjeru vlaknaca. Vlačna čvrstoća drva četinjača u smjeru vlaknaca kreće se od 50 do 150 N/mm^2 , dok se kod listača te vrijednosti kreću od 20 do 260 N/mm^2 . [30]

Također, čvrstoća ovisi i o količini vlage u drvu: što je veći sadržaj vlage to je čvrstoća niža (slika 3.5).



Slika 3.5. Utjecaj vlage na čvrstoću drva [8]

Osim tlačne i vlačne čvrstoće, kod drva još se ispituje smična, savojna, čvrstoća na cijepanje i na udarac.

Savojna čvrstoća drva je najčešće određivano svojstvo drva. Određuje se ili metodom savijanja u tri točke ili nekom drugom standardnom metodom. Kod metode savijanja u tri točke sila djeluje na sredini između oslonaca. Gornja polovica uzorka opterećena je tlačno, donja vlačno, a sredina uzorka je neutralna. Ispitni uzorci se opterećuju do loma. Normom je propisan prirast sile u jedinici vremena, kao i svi drugi potrebni parametri ispitivanja.

Savojna čvrstoća računa se prema izrazu (1.8):

$$R_{ms} = \frac{3F_{max} \times L}{2b \times h^2}, \text{N/mm}^2 \quad (1.8)$$

gdje je:

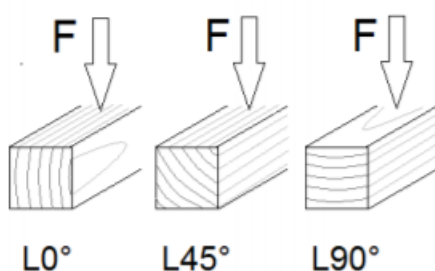
L – razmak između oslonaca u mm

b – širina uzorka u mm

h – visina uzorka u mm

F_{max} – maksimalna sila u N.

U tablici 1 prikazane su vrijednosti savojne čvrstoće nekih domaćih vrsta drva. Savojna čvrstoća ovisi o usmjerenosti strukture. Najviše vrijednosti ovog svojstva postižu se u longitudinalnom smjeru. Kod nekih vrsta drva savojna čvrstoća u longitudinalnom smjeru ovisi i o kutu između savojne sile i linije goda, slika 3.6. Kod nekih vrsta maksimalne vrijednosti postižu se pri kutu od 0° , kod drugih pri kutu od 45° ili 90° , a kod nekih ovaj kut nema utjecaja na vrijednost savojne čvrstoće.



Slika 3.6. Položaj godova u odnosu na smjer savojne sile [4]

Smična čvrstoća četinjača kreće se od 4,5 do 10 N/mm², dok se kod listača taj iznos kreće od 4,5 do 16 N/mm².

U tablici 3.2 prikazane su vrijednosti savojne i smične čvrstoće za neke domaće vrste.

Čvrstoća na cijepanje je manja u radijalnom nego u tangencijalnom smjeru što znači da je cjepljivost drva veća u smjeru drvnih trakova. [30]

U tablici 3.3. prikazane su prosječne vrijednosti tlačne čvrstoće domaćih vrsta drva.

Tablica 3.2. Vrijednosti savojne i smične čvrstoće nekih vrsta drva [8, 21]

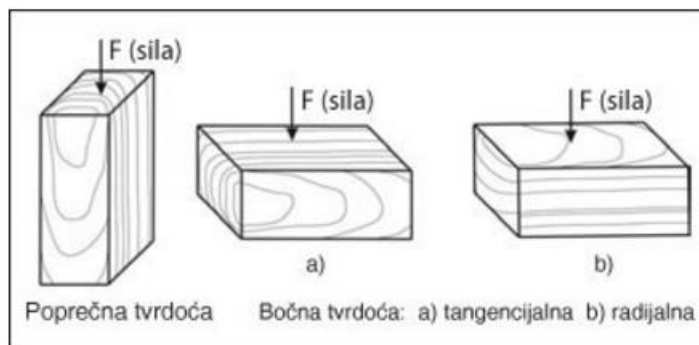
Vrsta drva	R_{ms} , N/mm ²	R_{mt} , N/mm ²
Ariš	64 – 132	4,5 – 10
Bor (crni)	69 – 198,5	6 – 15
Jela	47 – 118	4 – 6
Hrast	74 – 105	6 – 13
Jasen	58 – 210	9 – 15
Smreka	49 – 136	4 – 12

Tablica 3.3. Prosječne vrijednosti tlačne čvrstoće domaćih vrsta drva [8]

Vrsta drva	s vlaknima, N/mm ²	⊥ na vlakna, N/mm ²
jela, smreka	30 – 45	6
bor	35 – 50	7,5
ariš	45 – 55	10
topola	25 – 35	9
hrast, bukva, jasen, bagrem	50 – 70	13

3.3.2. Tvrdća drva

Tvrdoća drva je otpor kojim se drvo suprotstavlja prodiranju nekog drugog, tvrdog tijela u njegovu površinu. S obzirom na to da je drvo anizotropno tijelo, treba razlikovati poprečnu (paralelno na vlakanca), tangencijalnu i radijalnu tvrdoću (poprečno na vlakanca). Za tangencijalnu i radijalnu tvrdoću koristi se često naziv bočna tvrdoća. Pravac djelovanja sile pri mjerenju poprečne odnosno bočne tvrdoće prikazan je na slici 3.7. [31]

**Slika 3.7. Razlika između mjerenja poprečne i bočne tvrdoće [31]**

Za ispitivanje tvrdoće drva, danas se uglavnom koriste dvije metode:

- metoda po Brinellu
- metoda po Janki.

Metodom po Janki, tvrdoća se određuje na uzorcima dimenzija 50 x 50 x 30 mm. Mjeri se sila koja je potrebna da se čelična kuglica utisne u drvo do polovice svojeg promjera od 5,64 mm. Brzina utiskivanja je konstantna i ne prelazi 0,1 mm/s. Vrijednost tvrdoće se računa prema izrazu (1.9):

$$H_j = K \cdot F, [N] \quad (1.9)$$

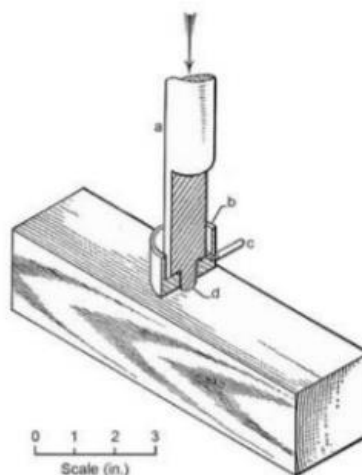
gdje je:

H_j – tvrdoća po Janki u N

K – koeficijent ovisan o dubini prodora kuglice

F – sila utiskivanja u N.

Na slici 3.8. prikazano je ispitivanje tvrdoće metodom po Janki.



Slika 3.8. Ispitivanje tvrdoće metodom po Janki [4]

Metodom po Brinellu, tvrdoća se ispituje na uzorcima prizmatičnog oblika sa stranicama od \approx 50 mm. Utiskuje se kuglica od kaljenog čelika promjera 10 mm pod opterećenjem od 500 N za mekše ili 1000 N za tvrde vrste drva. Trajanje povećanja sile do konačne vrijednosti iznosi 15 sekundi, a njeno opterećenje djeluje 25 ± 5 sekundi. Nakon rasterećenja, mjeri se promjer otiska kojeg čelična kuglica ostavi u površini drva.

Vrijednost tvrdoće računa se prema izrazu (1.10):

$$H_B = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1.10)$$

gdje je:

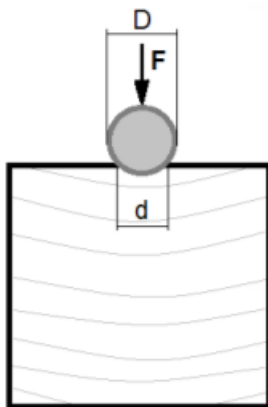
H_B - tvrdoća po Brinellu, N/mm^2

F – sila od 500 ili 1000 N

D - promjer kuglice

d - promjer otiska.

Na slici 3.9. prikazano je ispitivanje tvrdoće metodom po Brinellu.



Slika 3.9. Shematski prikaz mjerenja tvrdoće po Brinellu [4]

Tvrdoća ovisi o:

- botaničkoj vrsti
- anatomske građi
- vlažnosti
- sadržaju smole u drvetu
- lokalitetu uzimanja uzoraka [8]

Tvrdoća drva veća je u poprečnom presjeku za 1,6 do 2,5 puta od tvrdoće bočnog presjeka. [30]

U tablici 3.4. prikazani su razredi za tvrdoću drvo po Jankovoj metodi s pripadajućim vrstama drveta.

Tablica 3.4. Jankova skala za tvrdoću drva [30]

Razred	Granice, N/mm ²	Vrste drva
vrlo meko drvo	do 35	smreka, lipa, jela,...
meko drvo	35,1 – 50	ariš, breza, joha,...
srednjo tvrdo drvo	50,1 – 60	orah, brijest,...
tvrd drvo	60,1 – 100	hrast, trešnja, jasen,...
vrlo tvrdo drvo	100,1 – 150	crnika, žutika, maslina,...
drvo tvrdo kao kost	preko 150	ebanovina, gvajak,...

3.3.3. Modul elastičnosti

Modul elastičnosti predstavlja otpor nekog materijala prema elastičnoj deformaciji. Kod drva je jedno od najčešće određivanih mehaničkih svojstava čije se vrijednosti za različite vrste drva dosta razlikuju pa čak i unutar iste vrste. [4]

Čimbenici modula elastičnosti su:

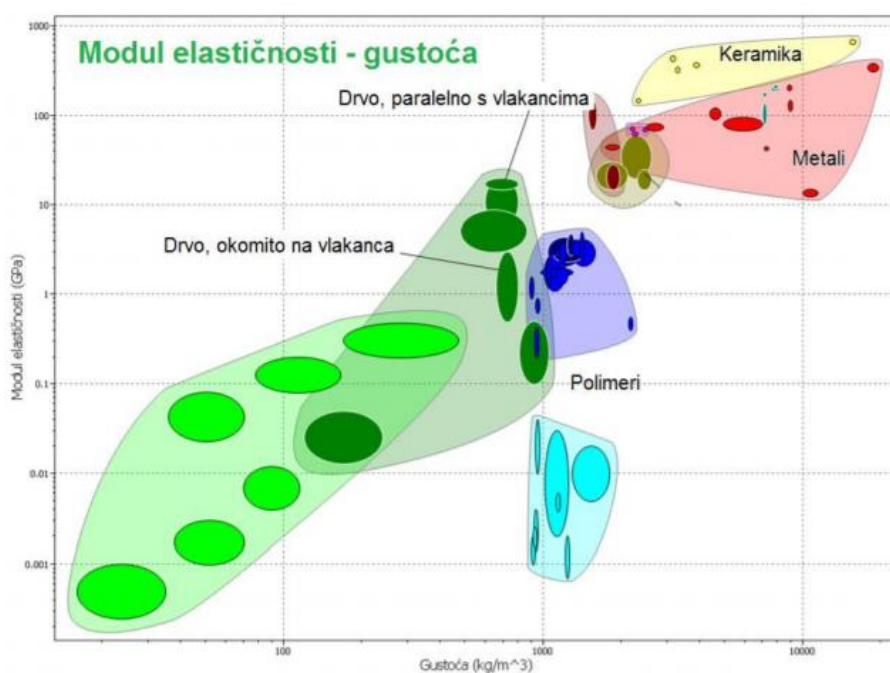
- vrsta drva
- građa drva
- gustoća drva
- sadržaj vode
- smjer vlaknaca
- temperatura
- oblik presjeka. [28]

Prosječna vrijednost modula elastičnosti iznosi od 3 do 25 GPa (tablica 3.5.). Ako se određuje modul elastičnosti u longitudinalnom pravcu (E_L), vrijednosti su 10 do 20 puta više od modula elastičnosti u radijalnoj (E_R) i tangencijalnoj osi (E_T).

Na slici 3.10. prikazana je specifična krutost (omjer modula elastičnosti i gustoće) drva koja ga čini jako vrijednim u odnosu na druge tehničke materijale. [4]

Tablica 3.5. Vrijednosti modula elastičnosti nekih domaćih vrsta drva [32]

Vrsta drva	Modul elastičnosti, GPa min – srednja- max
hrast	10 – 11,7 – 13,2
jasen	4,4 – 13,4 – 18,1
lipa	5,8 – 7,4 – 17,2
jela	6,6 – 10,7 – 17,2
smreka	7,3 – 10,7 – 21,4
ariš	6,3 – 13,8 – 20
brijest	5,9 -11 – 16



Slika 3.10. Specifična krutost drva i drugih tehničkih materijala [33]

3.3.4. Brzina zvuka

Brzina zvuka ovisi o modulu elastičnosti i gustoći. Način na koji zvučni val propagira kroz tijelo ovisi o unutarnjoj strukturi tog tijela. Mjerenjem brzine propagirajućeg zvučnog vala moguće je izračunati modul elastičnosti preko jednodimenzijske valne jednadžbe prema izrazu (1.11):

$$E = V^2 \cdot \rho \quad (1.11)$$

gdje je:

E – modul elastičnosti, Pa

V – brzina zvuka, m/s

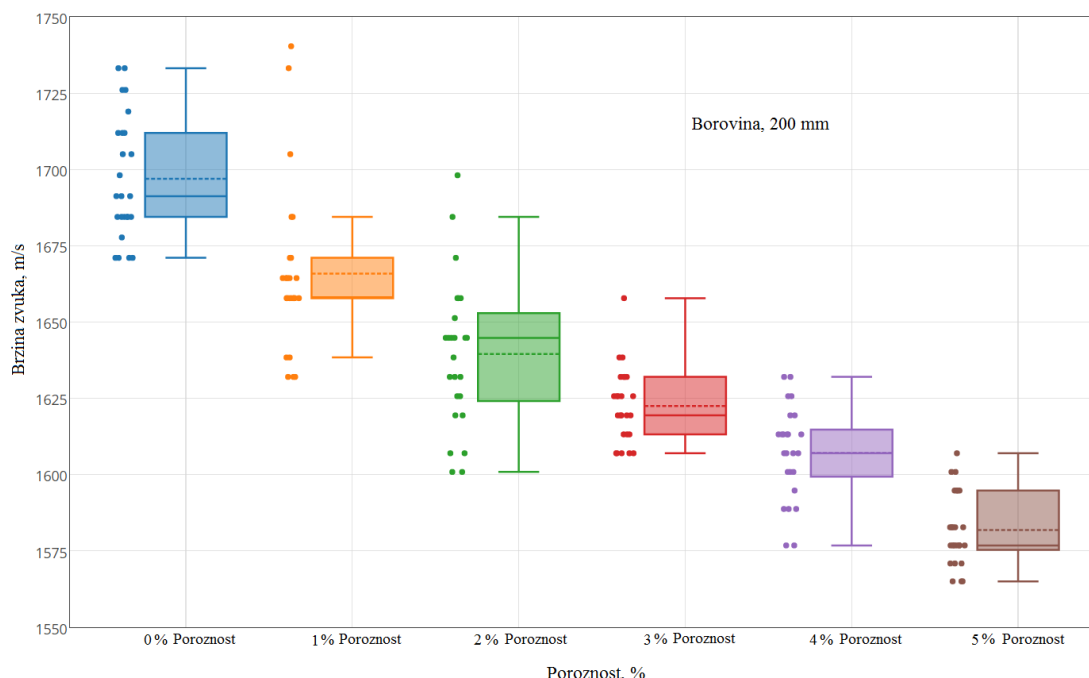
ρ – gustoća tijela, kg/m³

Na brzinu zvuka u drvu mogu utjecati različiti faktori, kao što su usmjerenost vlaknaca, udio vlage, temperatura drva, poroznost i dr.

U longitudinalnom smjeru (L) brzina zvuka je tri do pet puta veća nego u transverzalnom (T).

Brzina zvuka opada porastom temperature okoliša ili sadržaja vlage u drvu.

Na slici 3.11. prikazan utjecaj poroznosti drva na brzinu zvuka. [4, 34]



Slika 3.11. Utjecaj poroznosti na brzinu zvuka u poprečnom smjeru [35]

3.4. Otpornost na trošenje

Otpornost protiv trošenja je svojstvo drva da se ono opire postepenom narušavanju svoje površine uslijed djelovanja vanjskih mehaničkih sila. [30]

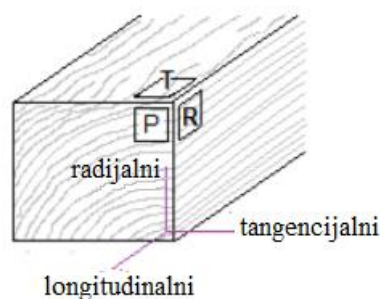
Iako ima različitih mehanizama i tipova trošenja materijala, najučestalija pojava trošenja drva je putem abrazije. Abrazijsko trošenje je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano prodiranjem tvrdih čestica ili tvrdih izbočina u površinske slojeve mekšeg materijala pri gibanju tijela. [36]

Danas još nema unificirane metode ispitivanja, stoga se ispitivanje može vršiti pomoću struje pijeska određenog oblika i veličine, pomoću brusnih ploča, brusnih papira, čelične metle i dr.

Nakon provedenog ispitivanja, otpornost prema trošenju može se mjeriti debljinom skinutog sloja koji je skinut s ravne i glatko obrađene površine drva, odnosno smanjivanjem volumena ili mase uzorka drva izloženog prodiranju tvrdih čestica.

Otpornost protiv trošenja ovisi o:

- vrsti drva
- građi drva
- gustoći drva
- presjeku (slika 3.12.)
- kemizmu
- sadržaju vode
- načinu obrade površine drva. [30]



Slika 3.12. Osnovne osi simetrije i osnovni presjeci u drvu (P, R, T) [4]

Poprečni presjek (P) ima najveću otpornost na abraziju, dok se radijalni presjek (R) troši malo više od tangencijalnog (T).

3.5. Trajnost drva

Trajnost drva je sposobnost da se ono odupre promjenama i razaranjima uslijed djelovanja atmosferilija, raznih kemijskih tvari i štetnika biljnog ili životinjskog porijekla. [28]

Trajnost drva ovisi o:

- kemijskom sastavu drva
- procesu osržavanja
- sadržaju smole
- gustoći drva
- vremenu i postupku sječe
- utjecaju staništa i dr. [1]

Na trajnost drva štetno djeluju česte promjene vlage i temperature zraka. Vlaga, u kombinaciji sa zrakom i toplinom postaje odlučan faktor razaranja drva jer se stvaraju povoljni uvjeti za razvoj mikroorganizama koji uništavaju drvo (truljenje, crvotočina, gljivičavost). Time mehanička čvrstoća materijala brzo opada, a nosivost konstrukcije potpuno prestaje. [28]

Najveću trajnost pokazuje drvo u potpuno suhoj prostoriji, jednolične, razmjerno niske temperature i bez pristupa zraka, dok najmanju trajnost pokazuje drvo upotrijebljeno u površinskom sloju zemlje. Kao primjer dobro očuvanog drveta, na slici 3.13 prikazan je drveni dvorac star preko 1300 godina. [1]



Slika 3.13. Drveni dvorac star preko 1300 godina (Nara, Japan) [1]

3.6. Toplinska svojstva drva

3.6.1. Toplinska vodljivost

Toplinska vodljivost drva je relativno niska zbog poroznosti drva. Što je drvo poroznije, to je koeficijent toplinske vodljivosti manji. U smjeru vlakancija, toplinska vodljivost drva je oko dva puta veća od one što je okomita na vlakancija. Na primjer, toplinska vodljivost bora u smjeru vlakancija je 0,22 W/mK, a okomita na vlakanca je 0,14 W/mK.

Drvo pruža višestruko veći otpor prolazu topline od drugih tehničkih materijala (tablica 3.6.). [4, 37]

Tablica 3.6. Vrijednosti toplinske vodljivosti drva i drugih materijala [4]

Materijal	četinjače	listače	opeka	beton	čelik	aluminij
koef. topl. vodljivosti, W/(m·K)	0,13	0,17	0,75	1,5	45	237

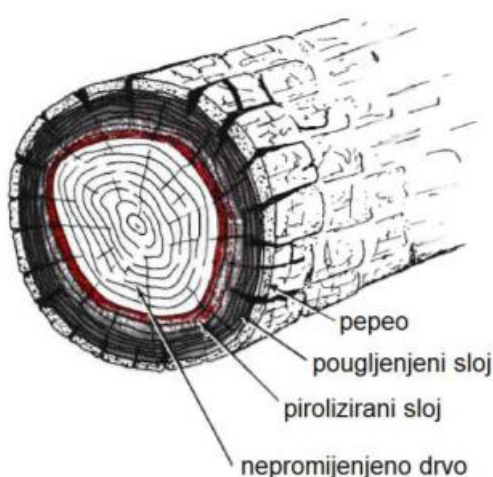
Toplinska vodljivost ovisi o:

- gustoći drva
- temperaturi
- usmjerenosti strukture
- udjelu vlage – povećanjem vlage povećava se i toplinska vodljivost. [37]

3.6.2. Zapaljivost i gorivost

Tvrdnja da drvo ne gori je zapravo točna. Prilikom izlaganja drva visokim temperaturama iz njega počinju hlapiti tvari koje u dodiru s otvorenim plamenom isparavaju iz drva. Zapaljivost drva može se smanjiti impregnacijom, nanošenjem različitih zaštitnih slojeva i/ili nekim pasivnim mjerama zaštite.

Tijekom izgaranja drva dolazi do kemijske razgradnje i pougljenja drva (drveni ugljen). Pougljeni sloj štiti drvo od toplinskog razaranja. Ispod sloja ugljena nalazi se pirolizirani sloj gdje je drvena tvar kemijski promijenjena, ali ne i potpuno razgrađena. Ispod piroliziranog sloja nalazi se nepromijenjeni dio u kojem su mehanička i druga svojstva ostala ista, slika 3.14.

**Slika 3.14. Slojevi nastali pri izgaranju drva [4]**

U trenutku zapaljenja hlapivih plinova dolazi do naglog porasta temperature i samim time povećanja sloja ugljena. Toplinska vodljivost drvenog ugljena je niska i zbog toga se ponaša kao izolacijski sloj koji štiti nepromijenjeni dio drva.

Kako se drvo ponaša u požaru najbolje pokazuje slika 3.15. Slika pokazuje posljedice požara u postrojenju za preradu mlijeka i na njoj se vidi kako su se čelični nosači zbog visoke temperature deformirali i pali na nagorjeli drveni nosač koji je zadržao čvrstoću i pod pritiskom se nije slomio. [4]



Slika 3.15. Drveni i čelični nosači nakon požara [4]

3.7. Estetska svojstva drva

Drvo je najvažniji materijal u ranoj ljudskoj povijesti, ali i danas ima veliki socijalni i estetski značaj. S estetskog stajališta, drvo je neosporno vrlo dekorativan i estetski visoko vrijedan materijal. Svako drvo prirodno ima svoju boju, sjaj i teksturu, a može se i dodatno obojati ili lakirati. [1, 38]

Estetska svojstva drva čine:

- boja
- tekstura
- sjaj
- miris
- okus [1]

3.7.1. Boja drva

Boja predmeta posljedica je svjetlosti koju neko tijelo zrači, odbija ili propušta. Ona je osobito važna u proizvodnji unutarnje opreme, namještaja i proizvoda za dekorativne namjene. Drvo apsorbira jedan dio vidljivog spektra, a ostatak reflektira. Reflektirani dio pada na retinu oka i stvara impresiju boje. Tonovi boja kreću se od svjetlijih, bjeličastih, crvenkastih, žućkastosmeđih pa sve do tamnih tonova. [1, 39]

Boja drva ovisi o:

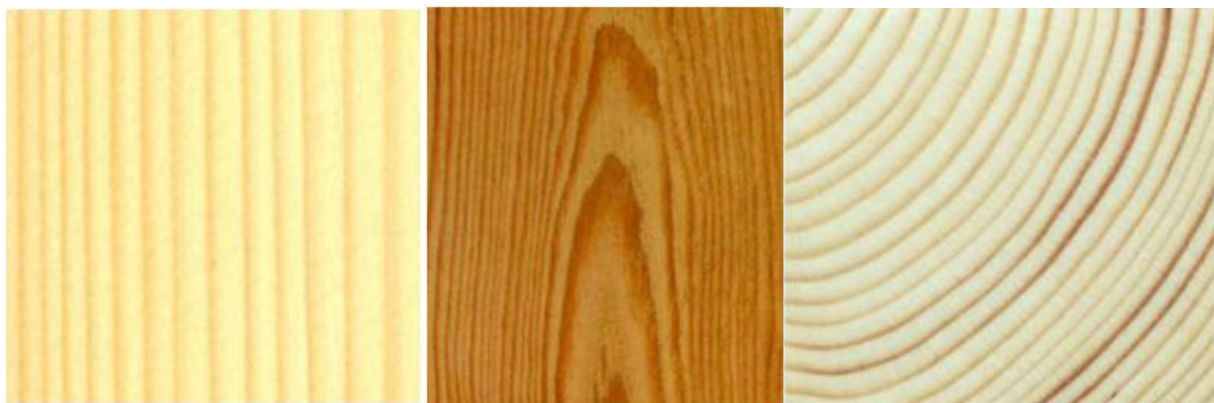
- *anatomskoj građi drva* – vrsti, veličini i orijentaciji staničnih elemenata, debljini stanične stijenke,...
- *kemijskom sastavu* – nakupljanje i taloženje akcesornih fenolnih tvari u jezgrenom dijelu, koje apsorbiraju svjetlost valnih duljina iznad 500 nm, razlog je za tamnije obojenje jezgrenih dijelova kod četinjača i listača u usporedbi sa svjetlijim dijelovima istih vrsta drva
- *fizikalnim karakteristikama* – zračenje svjetlosti, vlažnost drva, morfologija površine drva,...
- *staništu*
- *načinu obrade* – izvor obojenja nakon sječe ovisi o abiotičkim (temperatura, vlaga, plinovi i dr.) i biotičkim (bakterije, neke vrste gljiva i nametnici) čimbenicima [39, 40]

3.7.2. Tekstura drva

Tekstura drva je izgled drva na mehanički obrađenoj površini. Uvjetovana je dimenzijama, oblikom i smjerom nizanja, te udjelom i rasporedom pojedinih elemenata u građi drva. Tekstura može biti pravilna ili nepravilna. Nepravilna tekstura javlja se u obliku poprečnih rebara, valovitih linija, ikrica, cvjetova i kvržica, dok pravilnu teksturu čini normalna unutarnja građa koja, ovisno o vrsti presjeka, može biti poprečna, tangencijalna, radijalna ili spiralna (slika 3.16.). [1, 29, 41]

Različita tekstura postiže se:

- cijepanjem
- rezanjem
- piljenjem
- tokarenjem
- rezbarenjem [1]



Slika 3.16. Tekstura radijalnog (lijevo), tangencijalnog (sredina) i poprečnog (desno) presjeka drva [40]

3.7.3. Sjaj drva

Sjaj drva je svojstvo drva da odražava svjetlost, odnosno izgled koji površina poprima odbijanjem svjetlosti. U tablici 3.7. su prikazane vrste drva s obzirom na jakost sjaja.

Čimbenici sjaja su:

- *anatomska građa* – brojnost, veličina i glatkoća trakova
- *udio infiltrata* – ovisno o vrsti i količini infiltrata (masti, ulje, vosak)
- *presjek drva* – radijalne piljenice imaju veći sjaj od tangencijalnih
- *kut upada svjetla* – uočljivo kod drva nepravilne strukture (npr. javor rebraš) [1]

Tablica 3.7. Domaće vrste drva u ovisnosti o jakosti sjaja [1]

Jakost sjaja	Vrste drva
bez prirodnog sjaja	kruška, topola, crni grab, šišmir
slabiji sjaj	jela, šljiva, trešnja, obični grab, divlji kesten
jači sjaj	hrast, jasen, lipa, bukva, brijest, javor, bagrem, lijeska, joha, dud, bor

3.7.4. Miris drva

Svaka vrsta drva ima određeni miris koji ovisi o prirodi, količini i hlapljivosti infiltriranih tvari, debljini, površini i temperaturi drva. U pravilu, drvna tvar kod obične temperature nema miris, a ako ga ima onda je to posljedica infiltrata ili procesa razgradnje izazvane gljivama ili mikroorganizmima. Od nekih vrsta drveća izrađuju se kuglice za zaštitu od moljaca jer ih njihov

miris odbija. Karakterističan ugodan miris imaju lipa, maslina i četinjače koje sadrže smolu. [1, 40]

Ugodan miris ima:

- bor
- ariš
- smreka
- sandalovina

Neugodan miris ima:

- lovorika
- platana
- smrdljika
- šimšir [1]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja

U radu je istražen utjecaj mikrostrukture različitih vrsta drva na otpornost prema abrazijskom trošenju. S obzirom na to da je drvo porozan materijal istražen je utjecaj veličine, oblika i rasporeda pora na intenzitet trošenja. Pri ispitivanju abrazijskog trošenja varirana je kvaliteta brusnog papira od najfinijih (P800) do najgrubljih (P60).

U okviru planiranog istraživanja, provedena su sljedeća ispitivanja:

- analiza makro i mikro strukture
- određivanje gustoće drva
- otpornost abrazijskom trošenju

Nakon provedenih ispitivanja, dobiveni rezultati su analizirani i interpretirani te su doneseni odgovarajući zaključci.

4.2. Materijal za ispitivanje

Ispitivanja su provedena na uzorcima izrezanim iz četiri različite skupine drva s obzirom na oblik, veličinu i raspored pora u ranom i kasnom dijelu goda. Uzorci su uzeti iz sljedećih skupina:

1. četinjače s postupnim prijelazom iz ranog u kasni dio goda
2. četinjače s naglim prijelazom iz ranog u kasni dio goda
3. listače s naglim prijelazom iz ranog u kasni dio goda (prstenasto porozno drvo)
4. listače kod kojih se ne vidi prijelaz iz ranog u kasni dio goda (difuzno ili rastresito porozno drvo).

Predstavnici četinjača iz prve skupine su *jela* i *smreka*, a drugu skupinu predstavlja *ariš*. Prstenasto porozne listače predstavljaju *hrast*, *jasen* i *trešnja*, a *lipa* predstavlja rastresito porozne listače.

Uzorci za sva planirana ispitivanja izrezani su iz prosušenih dasaka.

Na slici 4.1. prikazan je uzorak za ispitivanje otpornosti na trošenje. Uzorak je kvadratnog poprečnog presjeka dimenzija 5,6 x 5,6 x 80 mm, a iz njega su izrezani uzorci za analizu mikrostrukture.

Na slici 4.2. prikazan je uzorak za određivanje gustoće i analizu makrostrukture. Uzorak je kvadratnog poprečnog presjeka dimenzija 20 x 20 x 45 mm.



Slika 4.1. Uzorak za ispitivanje mikrostrukture i otpornosti na abrazijsko trošenje



Slika 4.2. Uzorak za određivanje makrostrukture i gustoće

4.3. Analiza makro i mikro strukture

Analiza mikrostrukture je provedena na svjetlosnom mikroskopu OLYMPUS BX51, dok je makrostruktura snimljena upotrebom digitalnog fotoaparata.

Priprema uzorka kao i naknadna analiza makro i mikro strukture provedena je u Laboratoriju za polimere i kompozite Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Analizirana je mikrostruktura iz poprečnog presjeka drva. Nakon izrezivanja, uzorak (predmet promatranja) se postavlja na predmetno stakalce te se pokriva pokrovnim stakalcem.

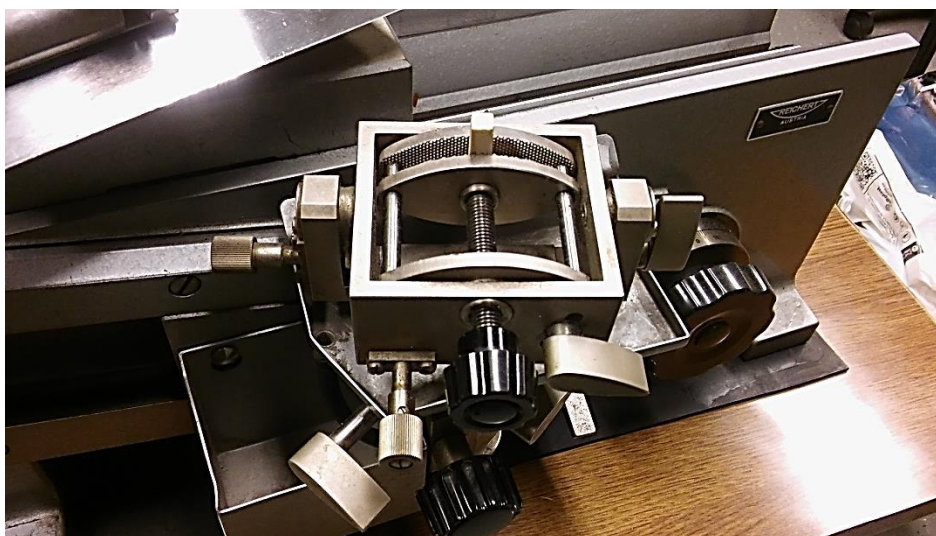
Makrostruktura drva je snimljena iz poprečnog presjeka, a svi uzorci za snimanje makrostrukture snimani su s uzoraka za određivanje gustoće.

4.3.1. Priprema uzorka

4.3.1.1. Izrezivanje

Izrezivanje vrlo tankih odsječaka drva za ispitivanje mikrostrukture provedeno je u smjeru poprečnog presjeka drva na mikrotomu s pomičnim nožem. Uzorak drva se postavlja između dvije metalne ploče u držač kliznog mikrotoma. Kada se uzorak orijentira, a prije nego se počne sa sječenjem, svi vijci moraju biti stegnuti, a samim time držač postaje nepokretan. Zatim se mikrotomski nož postavlja pod određenim kutom u odnosu na uzorak te upotrebom ručne sile, slobodno kliže po kliznoj stazi (vodilici), zahvaća uzorak i reže vrlo tanki preparat. Debljina presjeka se određuje okretanjem mikrotomske skale na željenu vrijednost. Pomicanjem mikrotomske skale uzorak se diže ili spušta. Minimalna debljina preparata koja se može dobiti rezanjem je 1 μm .

Na slici 4.3. prikazan je uređaj za izrezivanje histoloških preparata za ispitivanje mikrostrukture drva na svjetlosnom mikroskopu.



Slika 4.3. Izrezivanje uzoraka za ispitivanje mikrostrukture

4.3.1.2. Postavljanje na predmetno staklo

Nakon izrezivanja, preparati se postavljaju na predmetna stakalca u kapljicu vode te se na njih postavlja pokrovno stakalce. Pri tome treba pripaziti da ne ostanu mjehurići zraka između predmetnog i pokrovnog stakalca. Na slici 4.4. su prikazana dva preparata iste vrste drva spremna za mikroskopiranje.



Slika 4.4. Histološki preparat

4.3.2. Rezultati analize makro i mikro strukture

Analiza mikrostrukture je provedena na svjetlosnom mikroskopu OLYMPUS BX51, prikazanom na slici 4.5.

Makrostruktura je snimljena upotrebom digitalnog fotoaparata.

Analiziran je poprečni presjek drva.



Slika 4.5. Svjetlosni mikroskop OLYMPUS BX51

4.3.2.1. Analiza makro i mikro strukture prstenasto poroznih listača

Hrast

Na slici 4.6. prikazana je makrostruktura poprečnog presjeka hrasta snimljena na svjetlosnom mikroskopu, a na slici 4.7. prikazana je mikrostruktura istog presjeka.



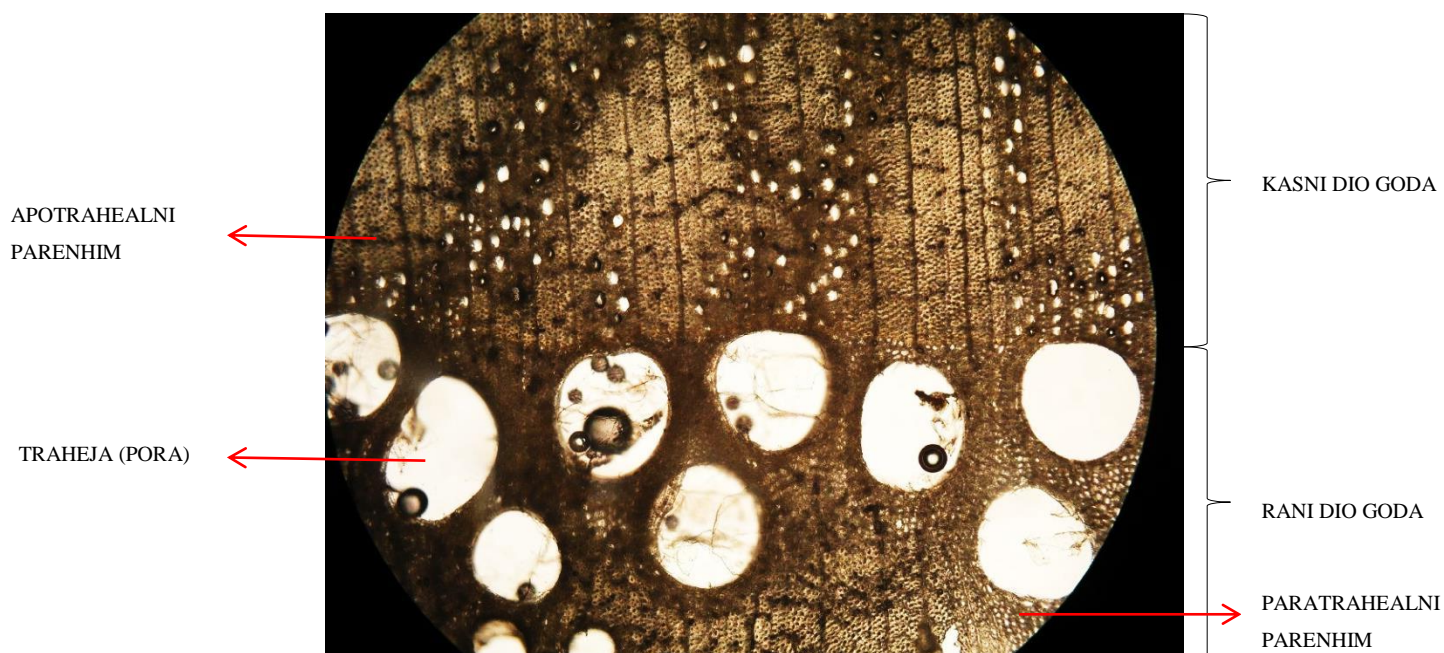
Slika 4.6. Makrostruktura poprečnog presjeka hrasta

Za makrostrukturu hrasta karakterističan je nagli prijelaz iz ranog u kasni dio goda, godovi su jače izraženi, a rani dio goda je svjetliji od kasnog dijela goda. Srednja širina godova iznosi 1,6 mm.

Traheje ranog drva vidljive su običnim okom, dok su traheje kasnog drva sitne i slabo uočljive. Traheje su grupirane samo u ranom dijelu goda.

Drvni traci su odlično vidljivi običnim okom, različite širine i rijetko raspoređeni.

Nizovi parenhimskih stanica su gusto raspoređeni i kraći od drvnih traka.



Slika 4.7. Mikrostruktura poprečnog presjeka hrasta

U ranom dijelu goda uočljive su pojedinačne velike okrugle stanice s debelom staničnom stijenkom i vrlo velikim lumenom, tzv. traheje. Nalaze se u uskom vijencu od 2 niza. Ostale stanice su puno manje, s tankom staničnom stijenkom i malim lumenom. Kako se krupne traheje nalaze samo u ranom dijelu goda, postiže se kružni raspored traheja zbog čega hrast i spada u skupinu prstenasto poroznih listača. Drvni traci su nanizani u redovima i homogeno su raspoređeni po cijelom presjeku.

Uz pomoć svjetlosnog mikroskopa, u kasnom dijelu goda uočavaju se nepravilni radijalni nizovi parenhimnih stanica (apotrahealni parenhim). U ranom dijelu goda, parenhimne stanice su grupirane uz traheje (paratrahealni parenhim).

JASEN

Na slici 4.8. prikazana je makrostruktura poprečnog presjeka jasena snimljena na svjetlosnom mikroskopu, a na slici 4.9. prikazana je mikrostruktura istog presjeka.



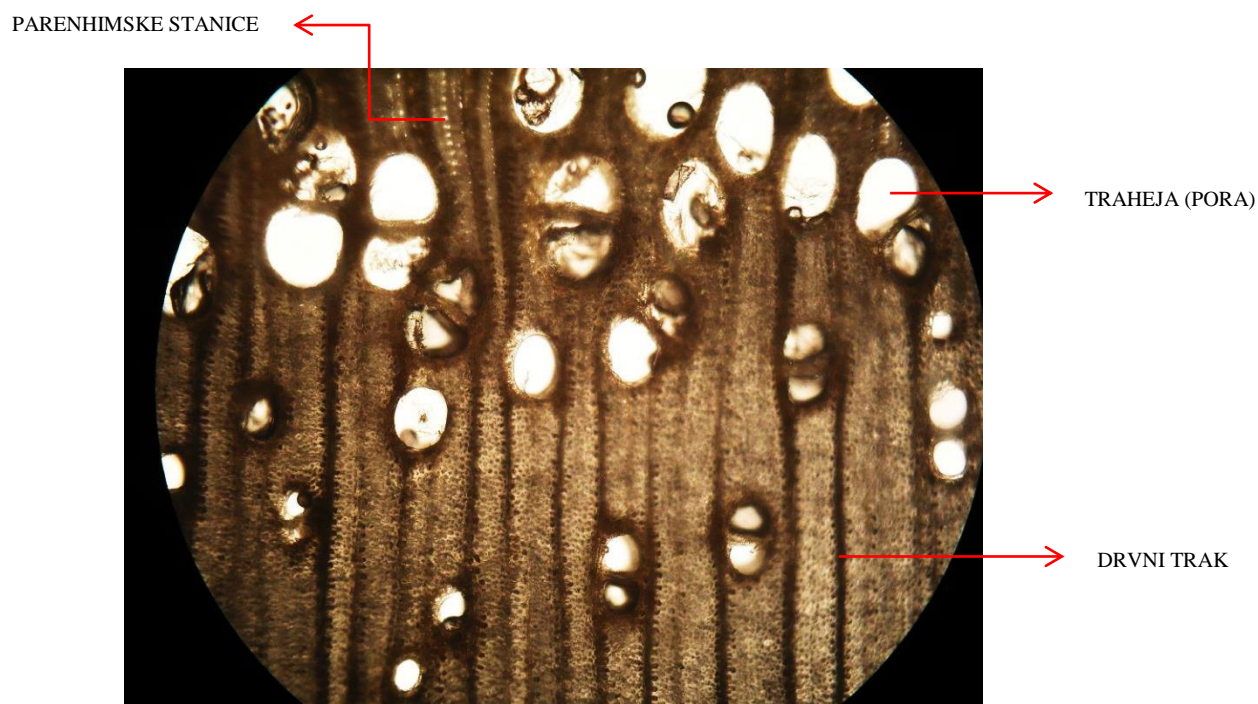
Slika 4.8. Makrostruktura poprečnog presjeka jasena

Na makrostrukтури jasena uočljiv je nagli prijelaz iz ranog u kasni dio goda.

Rani dio goda karakteriziraju ravnomjerno grupirane traheje vidljive golim okom, dok traheje u kasnom dijelu goda nisu uočljive.

Srednja širina goda iznosi 6,5 mm.

Drvni traci i ostale stanice nisu uočljive.



Slika 4.9. Mikrostrukutra poprečnog presjeka jasena

Na mikrostrukтури jasena jasno se vidi kako jasen pripada skupini prstenasto poroznih listača.

Rani dio goda karakterizira vijenac od tri niza velikih traheja.

Za razliku od hrasta, traheje u ranom dijelu goda su nešto manje i dolaze u paru.

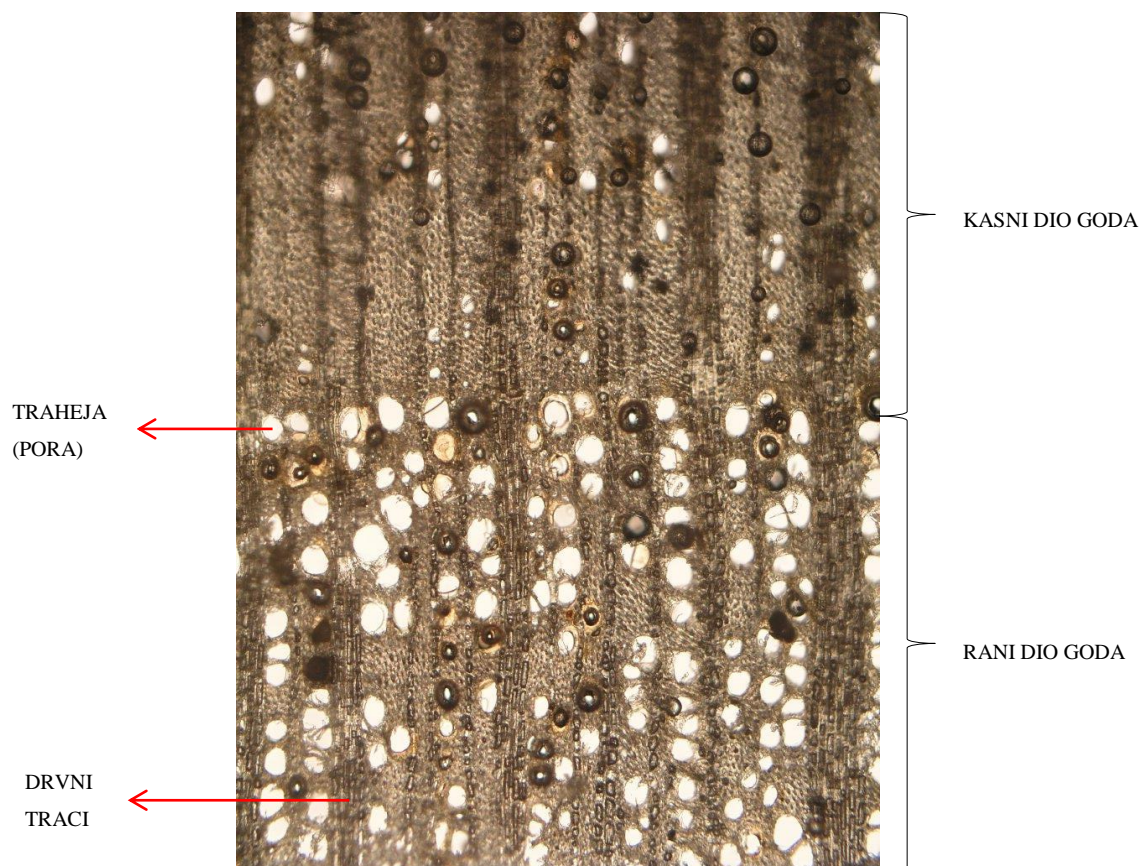
U kasnom dijelu goda, pore su malene i malobrojne.

Drvni traci su odlično uočljivi te su homogeno raspoređeni po cijelom presjeku.

U ranom dijelu goda mogu se uočiti i nizovi parenhimnih stanica ovisnih i neovisnih o trahejama.

Trešnja

Na slici 4.10. prikazana je mikrostruktura poprečnog presjeka trešnje snimljena na svjetlosnom mikroskopu.



Slika 4.10. Mikrostruktura poprečnog presjeka trešnje

Na mikrostrukтури trešnje vidl je granica ranog i kasnog drva koju karakterizira velika promjena poroznosti.

Traheje u ranom drvu su brojnije i puno gušće, ali i nešto veće nego traheje u kasnom drvu.

Traheje u kasnom drvu su pojedinačne u kratkim nizovima.

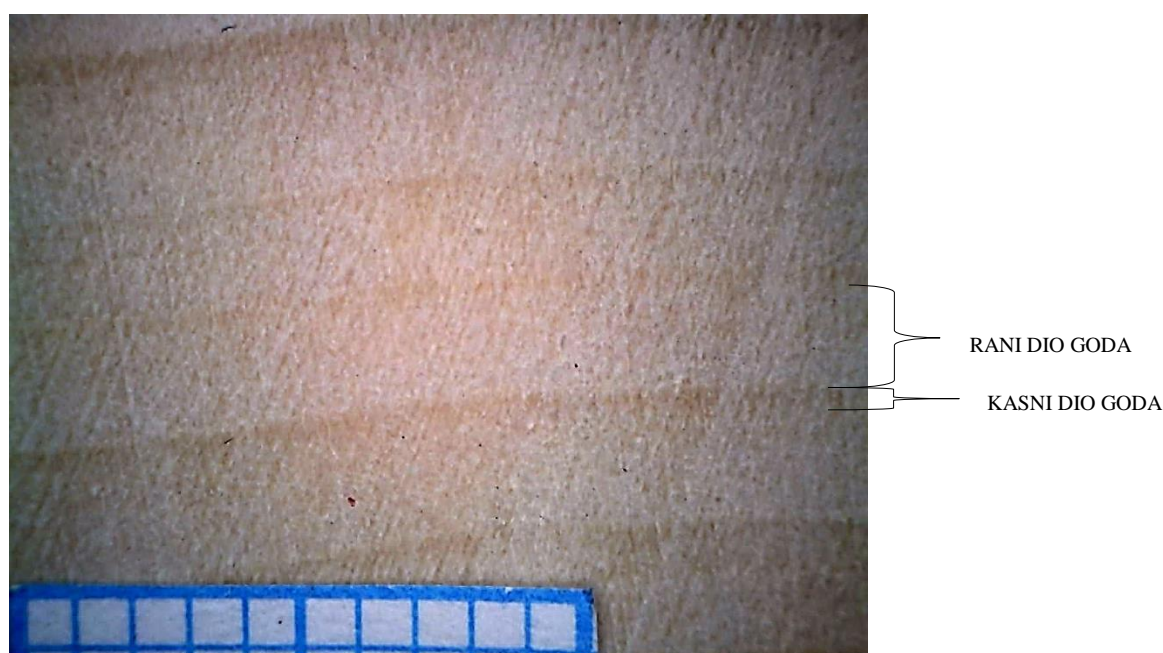
U mikrostrukтури se nalaze drvni traci s istim oblikom stanica. Njihova širina je različita (od jedne do pet parenhimnih stanica) i homogeno su raspoređeni po cijelom presjeku.

Za razliku od hrasta i jasena, mikrostruktura trešnje je sitno prstenasto porozna.

4.3.2.2. Analiza makro i mikro strukture difuzno poroznih listača

LIPA

Na slici 4.11. prikazana je makrostruktura poprečnog presjeka lipe snimljena na svjetlosnom mikroskopu, a na slici 4.12. prikazana je mikrostruktura istog presjeka.

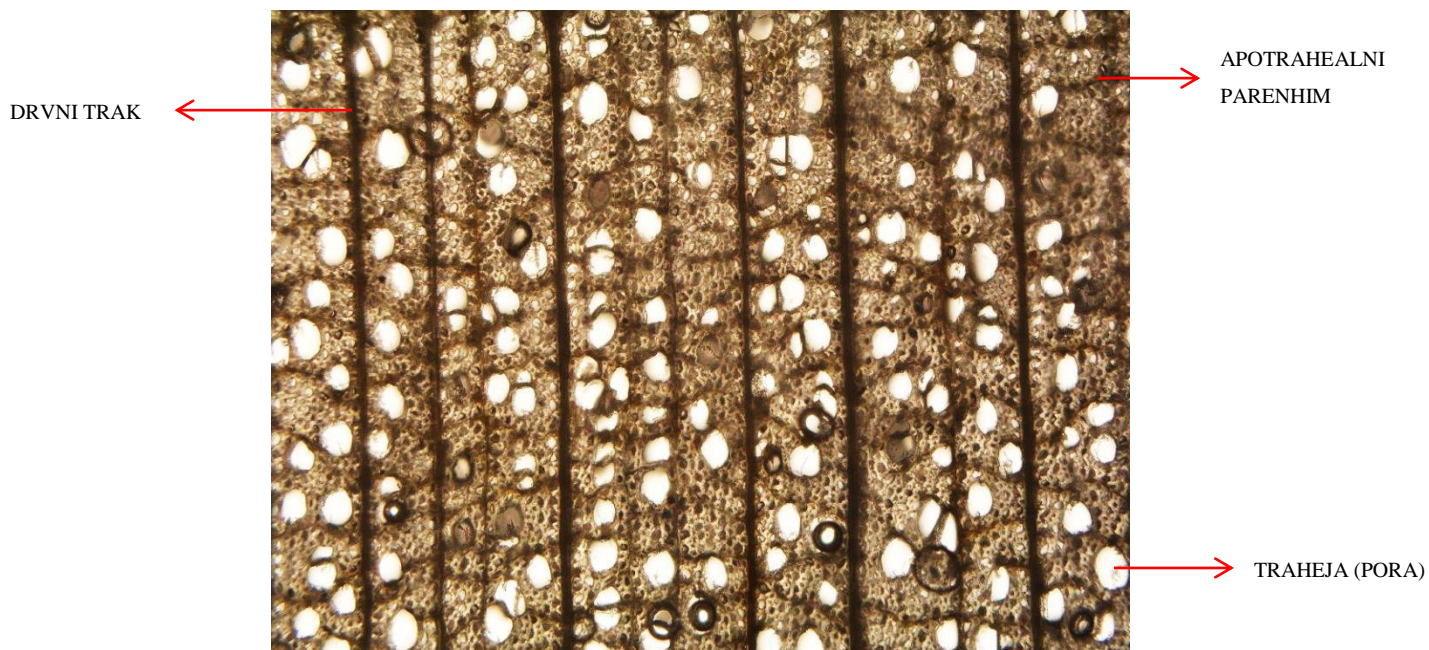


Slika 4.11. Makrostruktura lipe

Na slici makrostrukture, prijelaz iz ranog u kasno drvo se slabije vidi.

Kasni dio goda je puno širi nego rani dio goda. Srednja širina goda iznosi 2,5 mm.

Traheje, drvni traci i ostale stanice nisu uočljive.



Slika 4.12. Mikrostruktura poprečnog presjeka lipe

Rastresito porozno drvo s pojedinačnim ili trahejama u malim skupinama.

Na mikrostrukturi se ne vidi prijelaz iz ranog u kasni dio goda.

Traheje su jednoliko raspoređene što daje homogeniju građu drva i razlike unutar goda su male.

Drvni traci su vidljivi i među susjednim tracima prisutne su više od tri traheje.

Parenhimske stanice su homogeno raspoređene u nizovima duž cijelog presjeka i neovisne su o porama.

4.3.2.3. Analiza makro i mikro strukture četinjača

JELA

Na slici 4.13. prikazana je makrostruktura poprečnog presjeka jele snimljena na svjetlosnom mikroskopu, a na slici 4.14. prikazana je mikrostruktura istog presjeka.



Slika 4.13. Makrostruktura poprečnog presjeka jele

Rano drvo jele je široko i svijetlo. Kasno drvo je osrednje široko, nešto tamnije i dobro vidljivo.

Granica goda je uočljiva.

Godovi su markantni.

Srednja širina goda iznosi 3 mm.

Drvi traci su nevidljivi golim okom.

+



Slika 4.14. Mikrostruktura poprečnog presjeka jele

Prijelaz ranog drva u kasno drvo istog goda je postupan što se očituje u postupnom smanjivanju lumena stanica (traheida) četinjača.

Traheide ranog i kasnog dijela goda su kvadratnog ili pravokutnog oblika. U ranom dijelu goda imaju tanju stijenku i veći lumen nego u kasnom dijelu.

Na poprečnom presjeku vide se i drvni traci (tamne vertikalne pruge) koji su nešto širi u ranom drvu nego u kasnom.

SMREKA

Na slici 4.15. prikazana je makrostruktura poprečnog presjeka smreke snimljena na svjetlosnom mikroskopu, a na slici 4.16. prikazana je mikrostruktura istog presjeka.



Slika 4.15. Površina poprečnog presjeka smreke

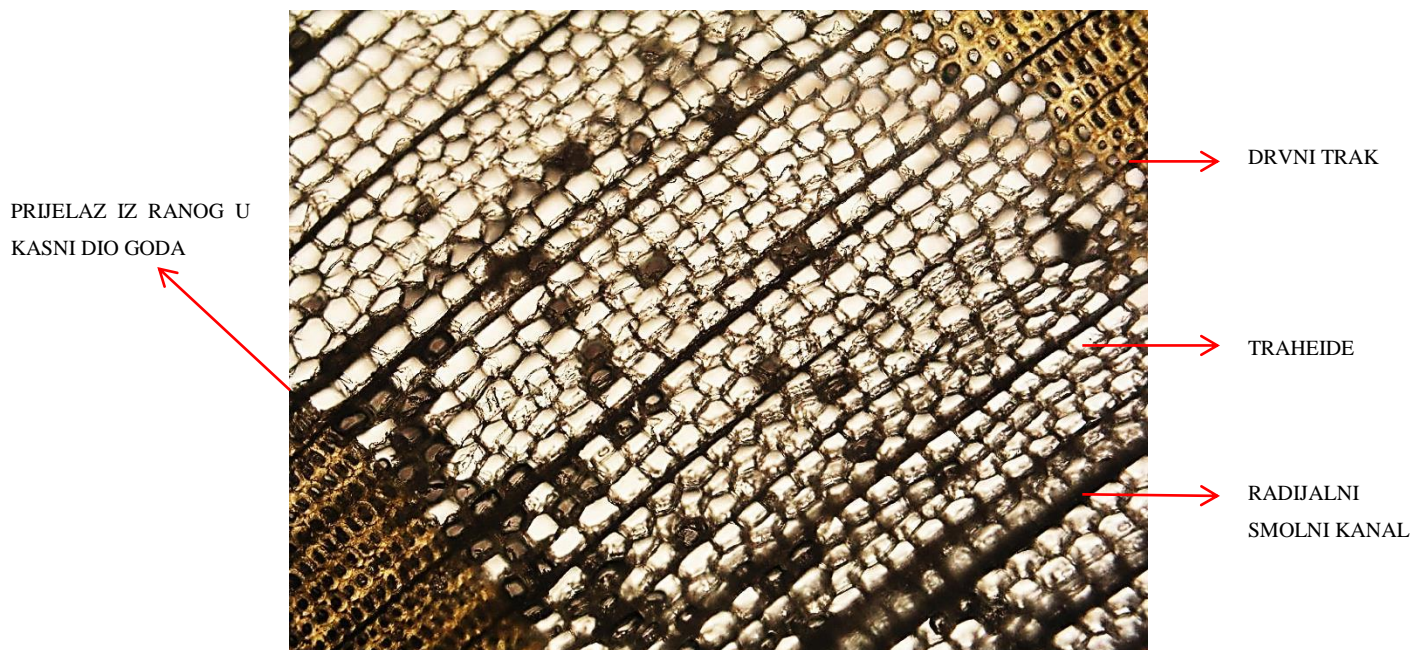
Na makrostrukturi smreke jasno su uočljiva područja ranog i kasnog drva. Tamnija područja predstavljaju kasni, dok svijetla rani dio goda.

Godovi su markantni.

Kasni dijelovi goda su različite širine (uski do srednje široki), dok je svi rani dijelovi goda približno isti širine.

Srednja širina godova iznosi 1,5 mm.

Drvni traci su nevidljivi golim okom.



Slika 4.16. Mikrostruktura poprečnog presjeka smreke s uočljivim prijelazima između godova

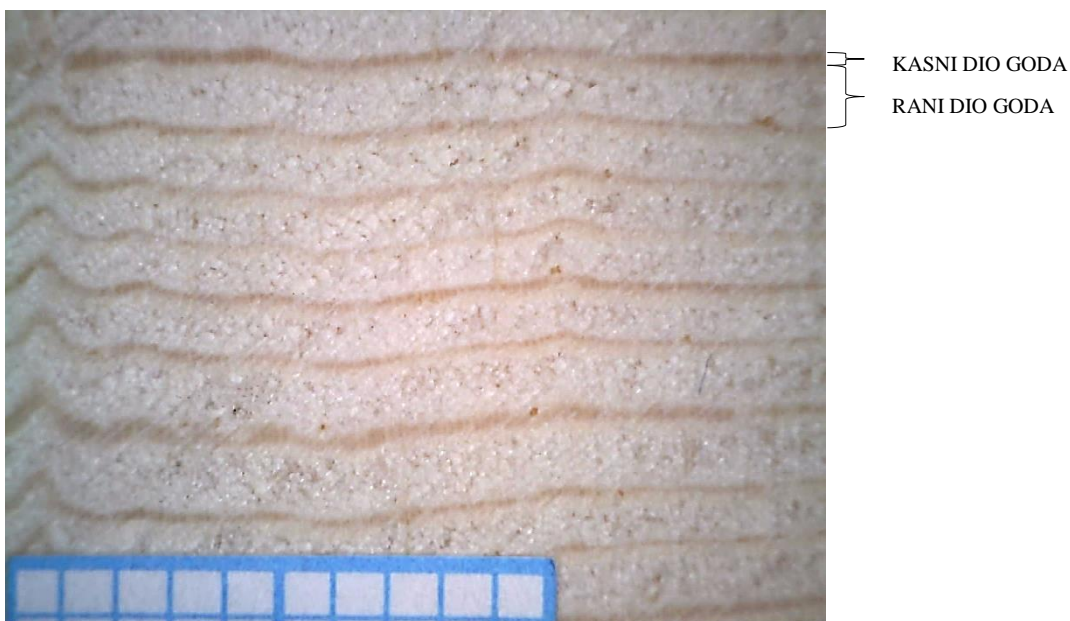
Na slici je vidljiv postupni prijelaz iz ranog dijela goda u kasni dio i nagli prijelaz iz kasnog u rani dio goda.

Rani dio karakteriziraju aksijalni nizovi traheida s većim lumenom i tanjom staničnom stijenkom (svijetlo područje), dok kasne dijelove goda čine traheide deblje stanične stijenke i manjeg lumena.

Drvni traci su tanki, ravni i homogeno raspoređeni. Mogu se primijetiti i znatno širi drvni traci koju su osim parenhimskih stanica, građeni i od smolnih kanala.

ARIŠ

Na slici 4.17. prikazana je makrostruktura poprečnog presjeka ariša snimljena na svjetlosnom mikroskopu, a na slici 4.18. prikazana je mikrostruktura istog presjeka.



Slika 4.17. Površina poprečnog presjeka ariša

Godovi su markantni te su lako uočljive razlike u boji između ranog i kasnog dijela goda.

Kasno drvo je mnogo tamnije i uže od ranog drva .

Srednja širina goda iznosi 1,3 mm.

Drvni traci i smolenice nisu uočljivi golim okom.



Slika 4.18. Mikrstruktura poprečnog presjeka ariša

Prijelaz iz kasnog u rano drvo je nagao, a iz ranog u kasno postepen. Rani dio goda čine kvadratne i pravokutne stanice (traheide) većeg lumena i tanje stijenke, dok se prelaskom u kasni, tamniji dio goda ti lumeni značajno smanjuju, a stijenke podebljavaju.

Između traheida protežu se tanki i ravni drvni traci građeni od parenhimskih stanica, ali mogu se naći i drvni traci koji sadrže i smolne kanale pa su stoga nešto širi.

4.4. Određivanje gustoće drva

Gustoća svih uzoraka određena je stereometrijskom metodom. Najprije je određen volumen uzorka mjerenjem širine, duljine i visine uzorka pomičnim mjerilom te vaganjem uzorka na mjernoj vagi.

Na slici 4.19. prikazan je uzorak smreke za određivanje gustoće i postupak mjerenja dimenzija uzorka.



Slika 4.19. Mjerenja dimenzija uzorka za određivanje gustoće

Postupak određivanja gustoće sastoji se od:

1. mjerenja dimenzija ispitnog materijala
2. vaganja ispitnog materijala na mjernoj vagi, prikazanoj na slici 4.20.
3. računanja gustoće preko formule 1.1



Slika 4.20. Mjerna vaga „Metler B5C 1000“

Mjerna vaga za mjerenje gubitka mase mora imati osjetljivost 0,001 g, osim kod ispitivanja otpornosti abraziji tankih slojeva na ispitnom uzorku kada se zahtjeva osjetljivost od 0,0001 g. [42].

U tablici 4.1. navedene su mase i volumeni ispitnih uzoraka te izračunata gustoća ispitnih materijala.

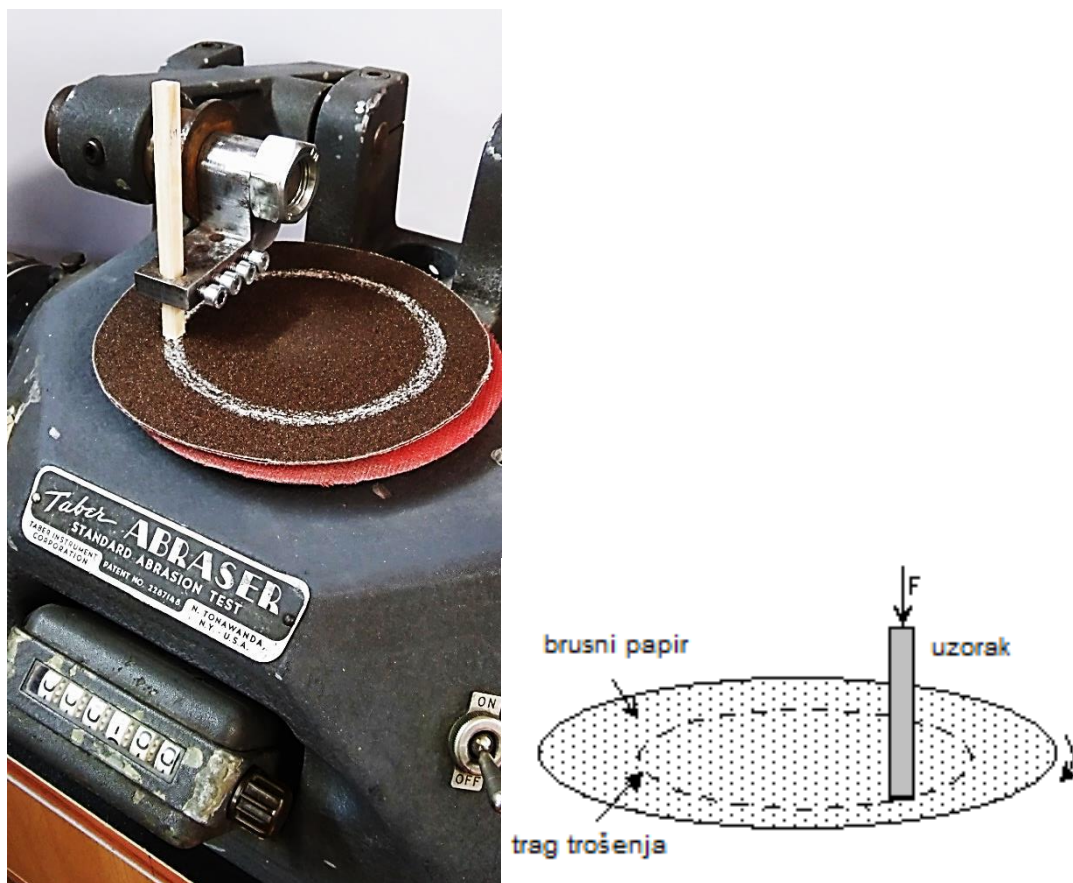
Tablica 4.1. Gustoća ispitnih materijala

Vrsta drva	Masa, g	Volumen, mm ³	Gustoća, g/cm ³
hrast	12,14630	17,741	0,6846
jasen	11,24005	17,574	0,6396
trešnja	12,72278	18,881	0,6739
lipa	10,57870	17,880	0,5919
jela	8,12457	18,338	0,4431
smreka	10,74420	18,321	0,5865
ariš	7,68098	17,209	0,4469

4.5. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je na uređaju „Taber abrader“, u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, prikazanom na slici 4.21. Za potrebe ispitivanja na uređaju je montiran odgovarajući prihvatač za uzorke.

Ispitivanja su provedena na uzorcima četvrtastog poprečnog presjeka, prikazanim na slikama od 4.22. do 4.28. Prije ispitivanja, površine uzoraka su pobrušene kako bi se dobila kvalitetnija površina. Dimenzije ispitnih uzoraka bile su 5,6 x 5,6 x 80 mm. Za svaku vrstu drva pripremljena su po tri uzorka. Svi uzorci su izrezani iz srčevine u longitudinalnom smjeru tako da se trošio poprečni presjek.



Slika 4.21. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje na uređaju „Taber abrader“



Slika 4.22. Uzorci hrasta za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje



Slika 4.23. Uzorci jasena za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje



Slika 4.24. Uzorci trešnje za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje



Slika 4.25. Uzorci lipe za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje



Slika 4.26. Uzorci jele za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje



Slika 4.27. Uzorci smreke za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje



Slika 4.28. Uzorci ariša za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

4.5.1. Provođenje ispitivanja

Ispitivanje je provedeno na sljedeći način:

1. vaganje uzorka
2. postavljanje brusnog papira na uređaj
3. postavljanje ispitnog uzorka u čeljust držača
4. trošenje ispitnog uzorka
5. skidanje ispitnog uzorka s uređaja i čišćenje
6. čišćenje ispitnog uzorka i brusnog papira
7. vaganje ispitnog uzorka na mjernoj vagi
8. računanje gubitka mase ispitnog uzorka.

Svako pojedinačno ispitivanje provedeno je pri 50 okretaja brusne ploče i ponovljeno tri puta, tako da je svaki uzorak izložen trošenju od ukupno 150 okretaja. Sve vrste drva ispitane su na sedam različitih kvaliteta brusnih papira od najfinijih (P800) do najgrubljih (P60). U tablici 4.2. prikazane su oznake korištenih brusnih papira i prosječne veličine abrazivnih čestica za svaki od njih. Uzorci su nakon ispitivanja čišćeni četkicom s finim vlaknima, a abradirane čestice s brusnog papira ispuhane su mlazom stlačenog zraka.

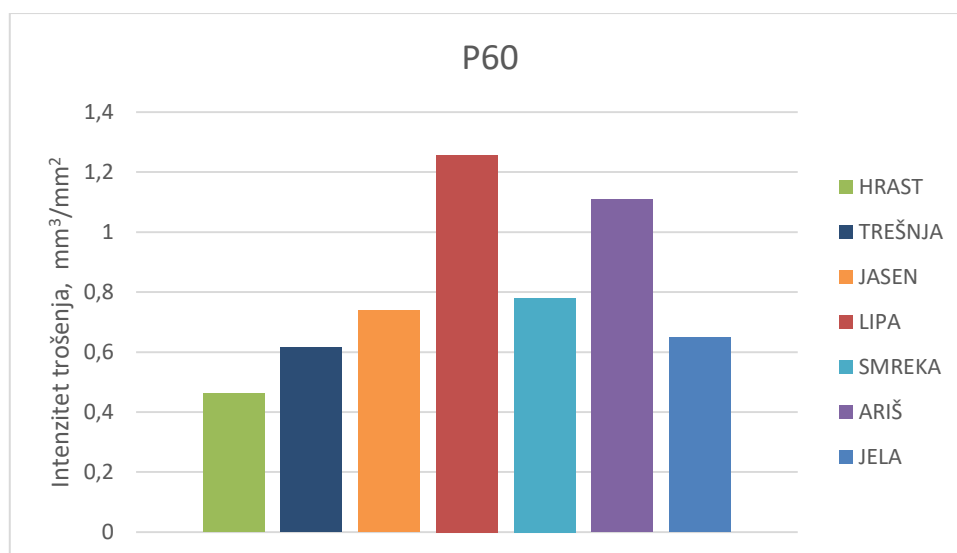
Za svaku pojedinačnu vrstu korišten je novi brusni papir.

Tablica 4.2. Prosječna veličina abrazivnih čestica brusnih papira

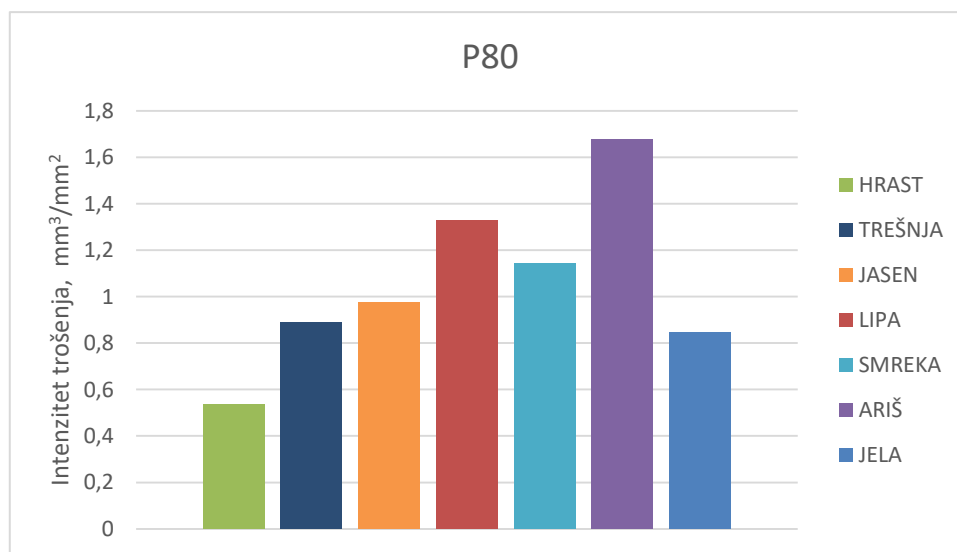
Oznaka	P60	P80	P100	P150	P240	P320	P800
prosječna veličina abrazivnih čestica, μm	269	201	162	100	58,5	46,2	21,8

4.5.2. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje

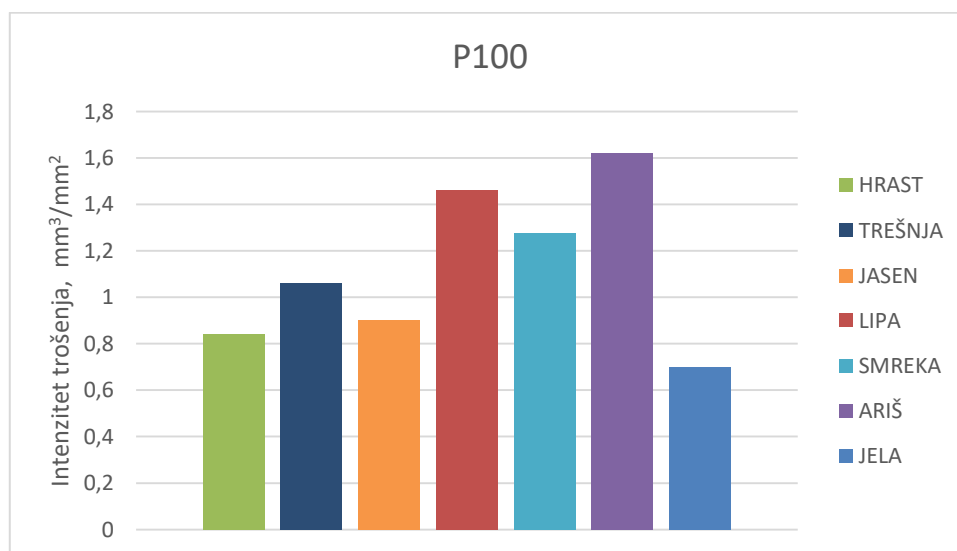
Na slikama od 4.29 do 4.35 prikazani su dijagrami na kojima se vidi intenzitet trošenja svih ispitivanih vrsta, za sve kvalitete brusnih papira. Vrste su poredane po pripadnosti osnovnim skupinama (listače i četinjače) i po gustoći (od viših prema nižim vrijednostima). Da bi se izbjegao utjecaj razlike u veličini trošenih površina, volumen potrošenog drva sveden je na površinu trošene plohe pa je intenzitet trošenja izražen u mm^3/mm^2 .



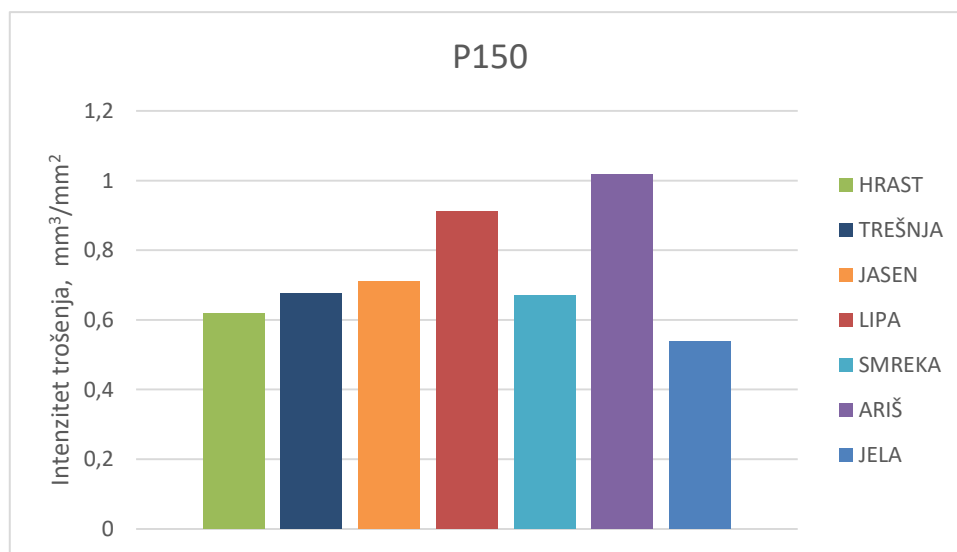
Slika 4.29. Intenzitet trošenja drva na brusnom papiru P60



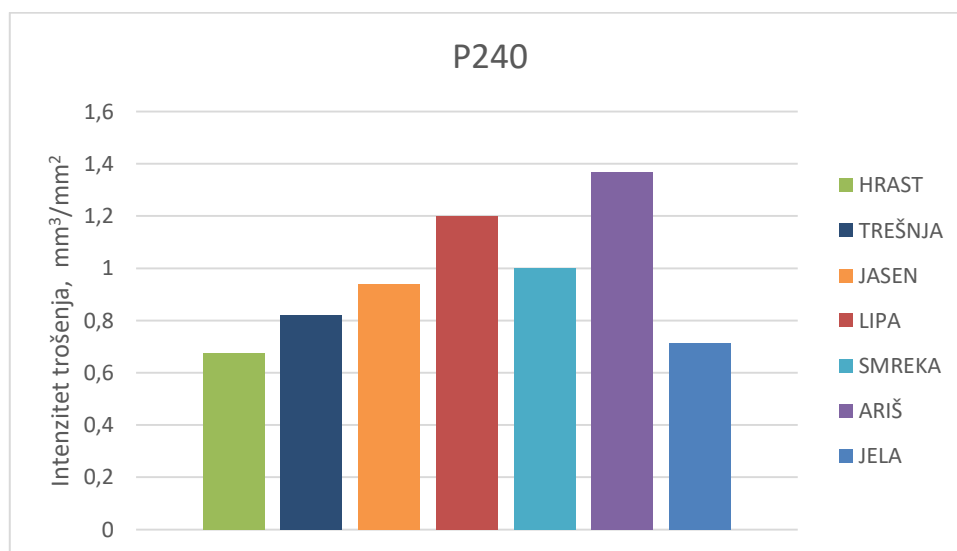
Slika 4.30. Intenzitet trošenja drva na brusnom papiru P80



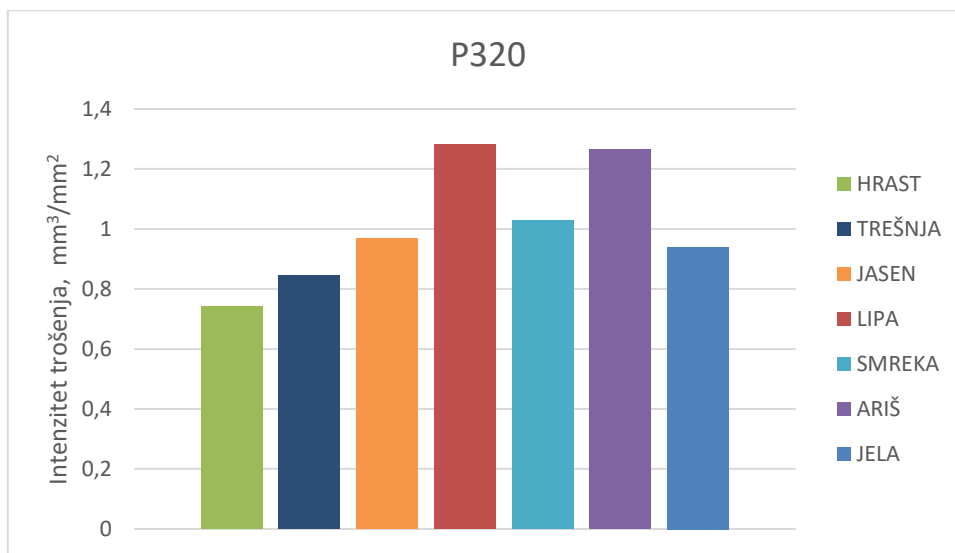
Slika 4.31. Intenzitet trošenja drva na brusnom papiru P100



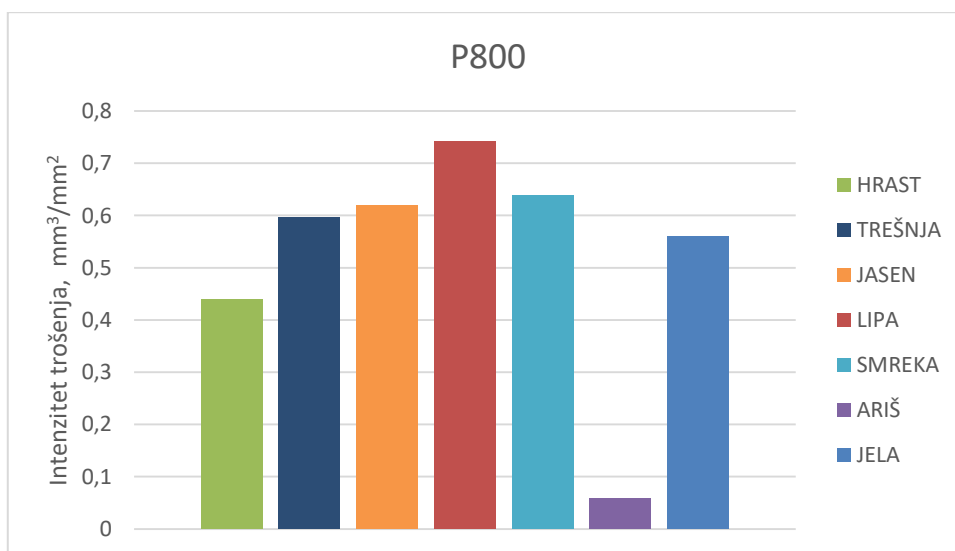
Slika 4.32. Intenzitet trošenja drva na brusnom papiru P150



Slika 4.33. Intenzitet trošenja drva na brusnom papiru P240



Slika 4.34. Intenzitet trošenja drva na brusnom papiru P320



Slika 4.35. Intenzitet trošenja drva na brusnom papiru P800

4.5.2.1. Prstenasto porozne listače

Iz skupine prstenasto poroznih listača u okviru ovog rada ispitani su hrast, jasen i trešnja.

U tablici 4.3. prikazane su dimenzije ispitnih uzoraka, gustoća, gubitak mase i intenzitet trošenja pri svim kvalitetama brusnog papira za hrast.

U tablici 4.4. prikazani su isti podaci za jasen, a u tablici 4.5. za trešnju.

Na slici 4.36. dijagramski je prikazana ovisnost intenziteta trošenja o veličini abrazivnih čestica (kvaliteti brusnog papira) za prstenasto porozne listače.

Tablica 4.3. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za hrast

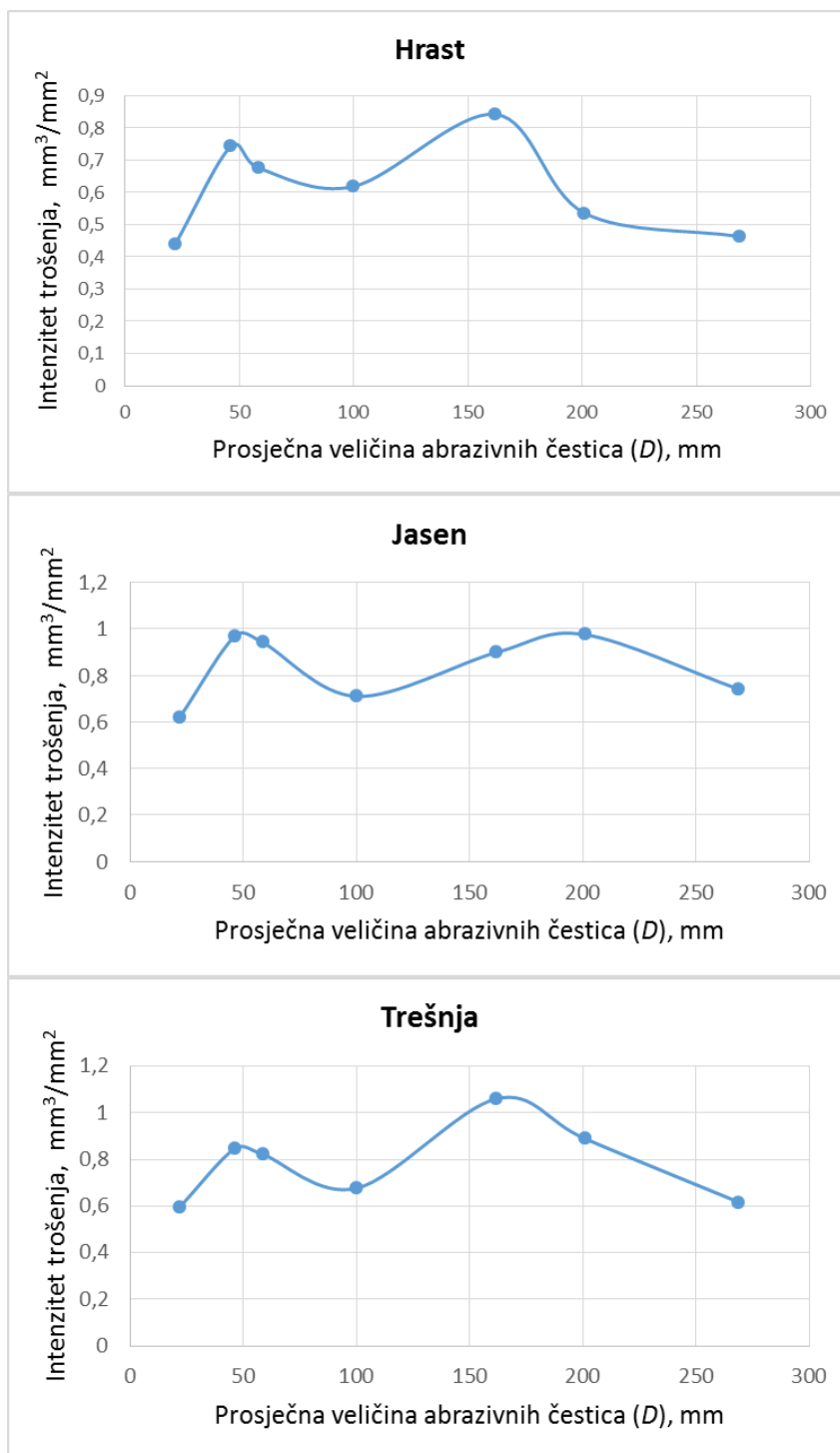
HRAST							
Brusni papir	P60	P80	P100	P150	P240	P320	P800
$D, \mu\text{m}$	269	201	162	100	58,5	46,2	21,8
$\Delta m_1, \text{mg}$	9,1	12,2	16,7	14,1	14,5	16,8	10,0
$\Delta m_2, \text{mg}$	9,6	11,0	15,2	13,2	14,0	15,7	9,9
$\Delta m_3, \text{mg}$	10,1	10,1	20,5	12,7	13,5	14,7	8,0
$\Delta m, \text{mg}$	9,6	11,1	17,5	13,3	14,0	15,7	9,3
$\rho, \text{g/cm}^3$	0,6846						
a, mm	5,48	5,48	5,48	5,45	5,48	5,78	5,78
b, mm	5,53	5,53	5,53	5,78	5,53	5,36	5,36
$\Delta m/(a \times b), \text{mg/mm}^2$	0,317	0,366	0,576	0,423	0,462	0,508	0,300
$\Delta V/(a \times b), \text{mm}^3/\text{mm}^2$	0,463	0,535	0,842	0,618	0,675	0,742	0,438

Tablica 4.4. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za jasen

JASEN							
Brusni papir	P60	P80	P100	P150	P240	P320	P800
$D, \mu\text{m}$	269	201	162	100	58,5	46,2	21,8
$\Delta m_1, \text{mg}$	12,0	16,8	14,3	12,1	13,9	16,6	10,5
$\Delta m_2, \text{mg}$	12,1	16,7	12,4	11,9	13,5	18,0	10,5
$\Delta m_3, \text{mg}$	11,1	12,9	16,1	11,5	17,4	11,5	8,5
$\Delta m, \text{mg}$	11,7	15,5	14,3	11,8	14,9	15,4	9,8
$\rho, \text{g/cm}^3$	0,6396						
a, mm	5,40	5,40	5,40	5,46	5,40	5,40	5,40
b, mm	5,01	5,01	5,01	5,21	5,01	5,01	5,01
$\Delta m/(a \times b), \text{mg/mm}^2$	0,434	0,572	0,527	0,416	0,552	0,568	0,363
$\Delta V/(a \times b), \text{mm}^3/\text{mm}^2$	0,739	0,975	0,899	0,709	0,941	0,969	0,620

Tablica 4.5. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za trešnju

TREŠNJA							
Brusni papir	P60	P80	P100	P150	P240	P320	P800
$D, \mu\text{m}$	269	201	162	100	58,5	46,2	21,8
$\Delta m_1, \text{mg}$	13,2	18,3	23,4	13,9	15,5	18,0	11,5
$\Delta m_2, \text{mg}$	11,6	15,9	22,6	13,2	19,6	16,8	15,0
$\Delta m_3, \text{mg}$	13,8	21,5	20,5	12,9	14,4	16,2	9,4
$\Delta m, \text{mg}$	12,9	18,6	22,2	13,3	16,5	17,0	12,0
$\rho, \text{g/cm}^3$	0,6739						
a, mm	5,67	5,67	5,67	5,52	5,60	5,60	5,60
b, mm	5,47	5,47	5,47	5,30	5,32	5,32	5,32
$\Delta m/(a \times b), \text{mg/mm}^2$	0,415	0,599	0,715	0,456	0,554	0,570	0,402
$\Delta V/(a \times b), \text{mm}^3/\text{mm}^2$	0,616	0,888	1,061	0,676	0,822	0,847	0,596



Slika 4.36. Ovisnost intenziteta trošenja o prosječnoj veličini abrazivnih čestica za prstenasto porozne listače

4.5.2.2. Difuzno porozne listače

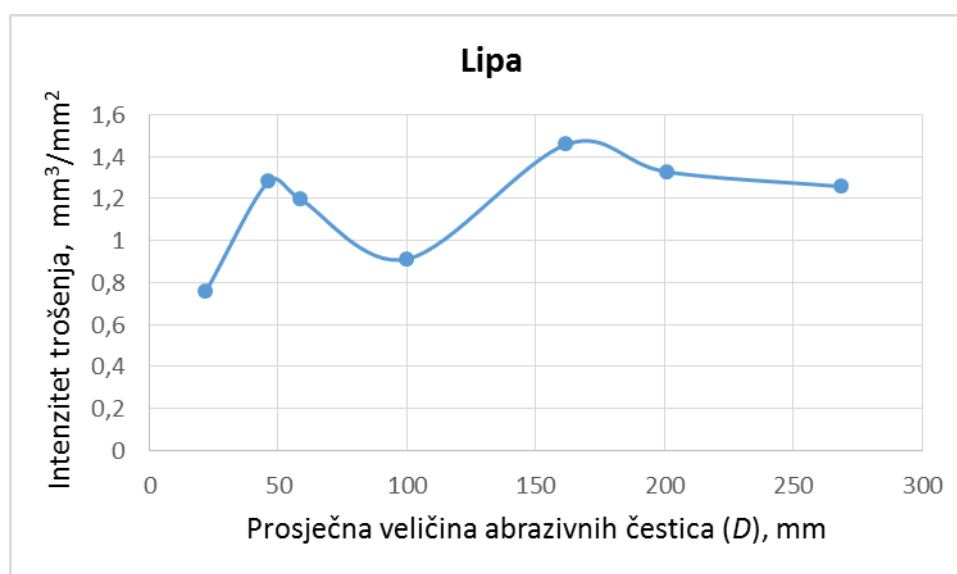
Kao predstavnik difuzno poroznih listača ispitana je lipa.

U tablici 4.6. prikazane su dimenzije ispitnih uzoraka, gustoća, gubitak mase i intenzitet trošenja pri svim kvalitetama brusnog papira za lipu.

Na slici 4.37. dijagramski je prikazana ovisnost intenziteta trošenja o veličini abrazivnih čestica za lipu.

Tablica 4.6. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za lipu

LIPA							
Brusni papir	P60	P80	P100	P150	P240	P320	P800
$D, \mu\text{m}$	269	201	162	100	58,5	46,2	21,8
$\Delta m_1, \text{mg}$	16,9	18,7	20,1	18,0	18,6	22,8	11,0
$\Delta m_2, \text{mg}$	17,3	19,7	24,3	14,8	17,4	18,8	10,0
$\Delta m_3, \text{mg}$	21,3	20,2	20,0	14,4	16,9	18,2	13,6
$\Delta m, \text{mg}$	18,5	19,5	21,5	15,7	17,6	19,9	11,5
$\rho, \text{g/cm}^3$	0,5919						
a, mm	5,30	5,30	5,30	5,50	5,30	4,86	5,41
b, mm	4,69	4,69	4,69	5,30	4,69	5,41	4,86
$\Delta m/(a \times b), \text{mg/mm}^2$	0,744	0,786	0,864	0,54	0,709	0,758	0,439
$\Delta V/(a \times b), \text{mm}^3/\text{mm}^2$	1,257	1,328	1,459	0,912	1,198	1,281	0,741



Slika 4.37. Ovisnost intenziteta trošenja o prosječnoj veličini abrazivnih čestica za lipu

4.5.2.3. Otpornost četinjača na abrazijsko trošenje

Iz skupine četinjača u okviru ovog rada ispitani su jela, smreka i ariš.

U tablici 4.7. prikazane su dimenzije ispitnih uzoraka, gustoća, gubitak mase i intenzitet trošenja pri svim kvalitetama brusnog papira za jelu.

U tablici 4.8. prikazani su isti podaci za smreku, a u tablici 4.9. za ariš.

Na slici 4.38. dijagramski je prikazana ovisnost intenziteta trošenja o veličini abrazivnih čestica za sve tri četinjače.

Tablica 4.7. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za jelu

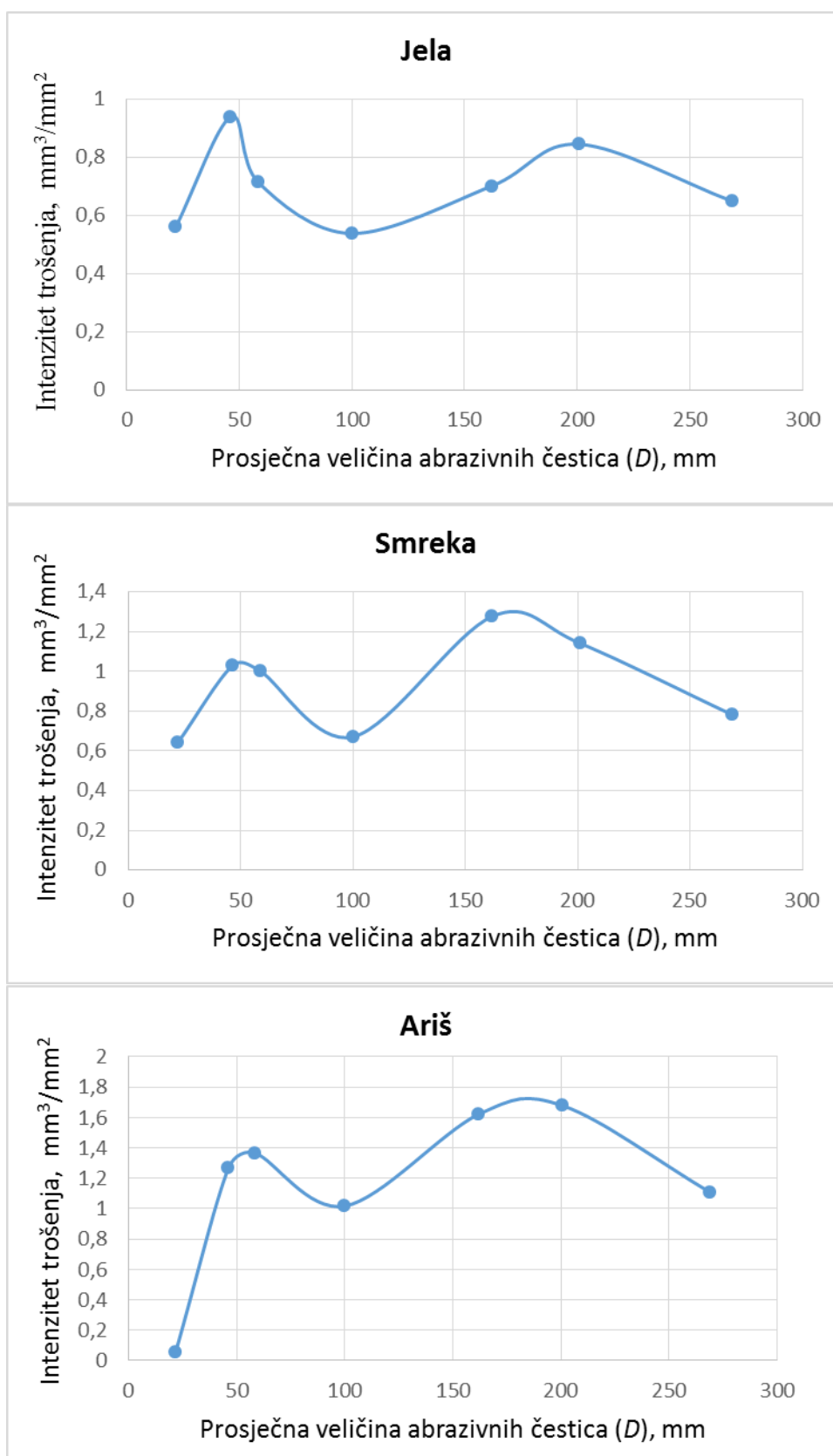
JELA							
Brusni papir	P60	P80	P100	P150	P240	P320	P800
$D, \mu\text{m}$	269	201	162	100	58,5	46,2	21,8
$\Delta m_1, \text{mg}$	9,9	11,4	10,1	8,3	10,8	13,0	8,5
$\Delta m_2, \text{mg}$	8,1	11,8	9,5	7,0	10,0	15,2	7,5
$\Delta m_3, \text{mg}$	9,1	12,1	9,7	7,2	9,0	11,2	7,5
$\Delta m, \text{mg}$	9,0	11,8	9,8	7,5	9,9	13,1	7,8
$\rho, \text{g/cm}^3$	0,4431						
a, mm	5,68	5,68	5,68	5,68	5,68	5,31	5,31
b, mm	5,53	5,53	5,53	5,53	5,53	5,94	5,94
$\Delta m/(a \times b), \text{mg/mm}^2$	0,288	0,375	0,311	0,239	0,316	0,416	0,248
$\Delta V/(a \times b), \text{mm}^3/\text{mm}^2$	0,649	0,846	0,702	0,539	0,714	0,940	0,561

Tablica 4.8. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za smreku

SMREKA							
Brusni papir	P60	P80	P100	P150	P240	P320	P800
$D, \mu\text{m}$	269	201	162	100	58,5	46,2	21,8
$\Delta m_1, \text{mg}$	13,5	23,3	21,0	12,0	15,5	16,3	10,9
$\Delta m_2, \text{mg}$	15,0	17,7	23,2	10,1	13,8	16,0	10,1
$\Delta m_3, \text{mg}$	11,5	17,5	21,3	9,8	17,4	15,6	8,8
$\Delta m, \text{mg}$	13,3	19,5	21,8	10,6	15,6	16,0	9,9
$\rho, \text{g/cm}^3$	0,5865						
a, mm	5,35	5,35	5,35	4,87	5,00	5,00	5,00
b, mm	5,45	5,45	5,45	5,55	5,30	5,30	5,30
$\Delta m/(a \times b), \text{mg/mm}^2$	0,457	0,669	0,749	0,393	0,587	0,603	0,375
$\Delta V/(a \times b), \text{mm}^3/\text{mm}^2$	0,780	1,140	1,277	0,671	1,002	1,027	0,639

Tablica 4.9. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za ariš

ARIŠ							
Brusni papir	P60	P80	P100	P150	P240	P320	P800
$D, \mu\text{m}$	269	201	162	100	58,5	46,2	21,8
$\Delta m_1, \text{mg}$	13,3	21,3	18,8	15,4	15,5	14,7	0,8
$\Delta m_2, \text{mg}$	16,0	21,2	18,0	12,4	13,8	13,2	0,7
$\Delta m_3, \text{mg}$	13,0	21,5	18,6	13,0	17,4	15,4	0,7
$\Delta m, \text{mg}$	14,1	21,3	18,5	13,6	15,6	14,4	0,7
$\rho, \text{g/cm}^3$	0,4468						
a, mm	5,12	5,12	5,47	5,96	5,47	5,47	5,53
b, mm	5,56	5,56	4,66	5,02	4,66	4,66	5,07
$\Delta m/(a \times b), \text{mg/mm}^2$	0,495	0,749	0,724	0,455	0,611	0,566	0,0262
$\Delta V/(a \times b), \text{mm}^3/\text{mm}^2$	1,108	1,677	1,621	1,017	1,367	1,267	0,059



Slika 4.38. Ovisnost intenziteta trošenja o prosječnoj veličini abrazivnih čestica za skupinu četinjača

5. ANALIZA REZULTATA

5.1. Osvrt na analizu strukture

Provedena analiza mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu potvrđuje kako hrast, jasen i trešnja pripadaju skupini prstenasto poroznih listača, lipa skupini difuzno poroznih, a jela, smreka i ariš skupini četinjača koje ne sadrže velike provodne sudove – pore (traheje).

Analizom mikrostrukture utvrđeno je kako se razlika između prstenasto i difuzno poroznih listača očituje u rasporedu pora. Kod prstenasto poroznih listača pore su smještene u ranom dijelu goda, a kod difuzno poroznih listača pore su ravnomjerno raspoređene u ranom i kasnom dijelu goda. Kod hrasta su pojedinačne pore najveće, nešto manje su kod jasena, a najmanje su kod trešnje. Pore su kod hrasta nanizane u dva reda i međusobno odijeljene. Kod jasena su pore smještene u nekoliko nizova i često dolaze u paru. Kod trešnje je rani dio goda potpuno prekriven nizovima sitnijih pora, a u kasnom dijelu goda nalazi se malo pojedinačnih pora.

Kod lipe, predstavnice difuzno poroznih listača, pore su homogeno raspoređene i nema razlike između ranog i kasnog dijela goda.

Sve četinjače imaju pravokutne stanice (traheide), a međusobno se razlikuju po oštrini prijelaza iz ranog u kasni dio goda. Jela i smreka postupno prelaze iz ranog u kasni dio goda, a kod ariša je prijelaz nagli. Kod ariša u poprečnom presjeku uočene su brojne smolenice, a kod smreke su mjestimice uočeni smolni kanali uz drvene trake.

S obzirom na poroznost ispitane vrste se dosta razlikuju.

5.2. Osvrt na rezultate mjerenja gustoće drva

Analizom dobivenih rezultata vidljivo je da jela, smreka i ariš iz skupine četinjača imaju manju gustoću od listača. Najveću gustoću ima smreka ($0,587 \text{ g/cm}^3$), a gustoća jela i ariša je podjednaka ($0,443$ i $0,447 \text{ g/cm}^3$).

Od listača najveću gustoću posjeduje hrast ($0,68463 \text{ g/cm}^3$), a nešto malo manju vrijednost gustoće ima trešnja ($0,674 \text{ g/cm}^3$). Najmanju gustoću od svih ispitanih listača ima difuzno porozna lipa ($0,592 \text{ g/cm}^3$).

5.3. Osvrt na rezultate abrazijskog trošenja

Veza između gustoće i intenziteta trošenja

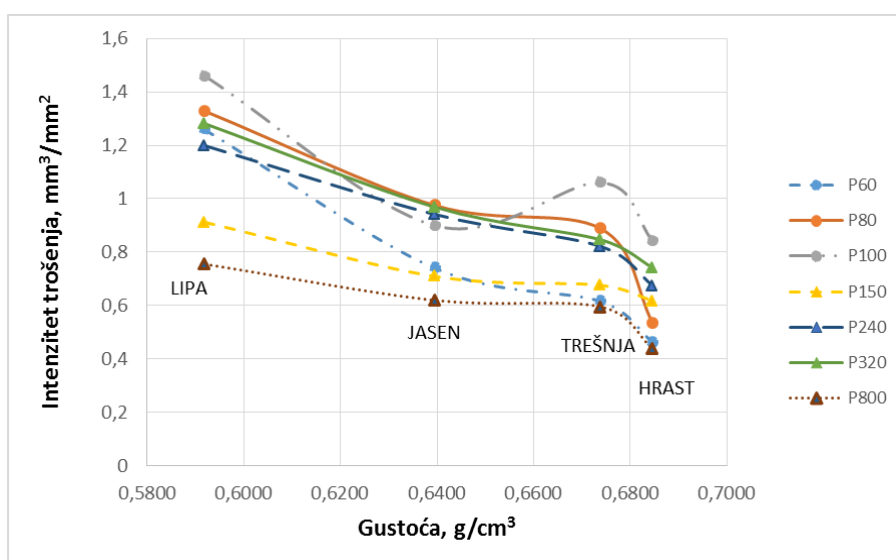
Utjecaj gustoće na intenzitet trošenja promatran je odvojeno za listače i četinjače.

Na slici 5.1. prikazan je utjecaj gustoće drva listača na intenzitet abrazijskog trošenja.

Iz slike se može vidjeti da gustoća drva utječe na intenzitet abrazijskog trošenja. Općenito vrijedi da se s porastom gustoće smanjuje intenzitet trošenja za sve kvalitete brusnog papira.

Zanimljivo je uočiti da jasen i trešnja imaju relativno veliku razliku u gustoći u odnosu na trešnju i hrast, a puno manju razliku u intenzitetu trošenja. Iako trešnja i hrast imaju razliku u gustoći od 1%, intenzitet trošenja je puno manji kod hrasta. Ovo vrijedi za sve kvalitete brusnog papira, osim za papir oznake P100 koji izaziva veće trošenje gušće trešnje od jasena koji ima nižu gustoću.

Sve navedeno ukazuje na činjenicu da gustoća utječe na intenzitet abrazijskog trošenja, ali da veliki utjecaj na intenzitet trošenja ima i mikrostruktura (broj, veličina i raspored pora).

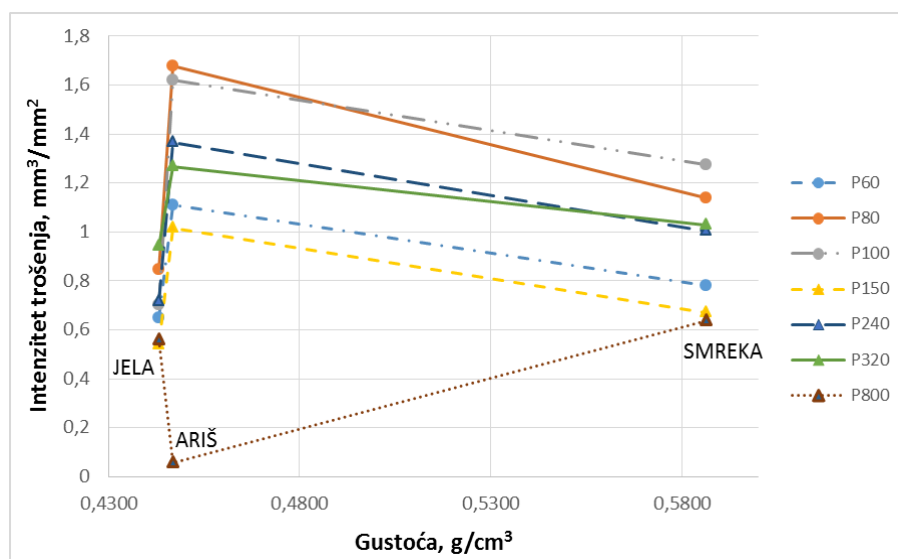


Slika 5.1. Utjecaj gustoće drva listača na intenzitet abrazijskog trošenja

Na slici 5.2. prikazan je utjecaj gustoće na intenzitet abrazijskog trošenja kod četinjača.

Na prvi pogled ne može se uočiti ovisnost intenziteta trošenja o gustoći. Gustoće ariša i jela se neznatno razlikuju (manje od 0,5%), a razlika u intenzitetu trošenja je relativno velika. Iako je gustoća ariša nešto malo viša, njegov intenzitet trošenja je znatno veći, osim kod papira P800. Razlog tome mogla bi biti prisutnost smole u drvu ariša (jela ne sadrži smolenice), ali i razlika u odnosu između širine ranog i kasnog dijela goda te razlika u načinu prijelaza iz ranog u kasni dio goda (ariš ima nagli, a jela postupni prijelaz).

Zanimljivo je da se smreka koja ima višu gustoću od jele troši intenzivnije. Obje vrste imaju postupni prijelaz iz ranog u kasni dio goda, a razlikuju se po tome što smreka u svojoj strukturi sadrži smolenice.



Slika 5.2. Utjecaj gustoće drva četinjača na intenzitet abrazijskog trošenja

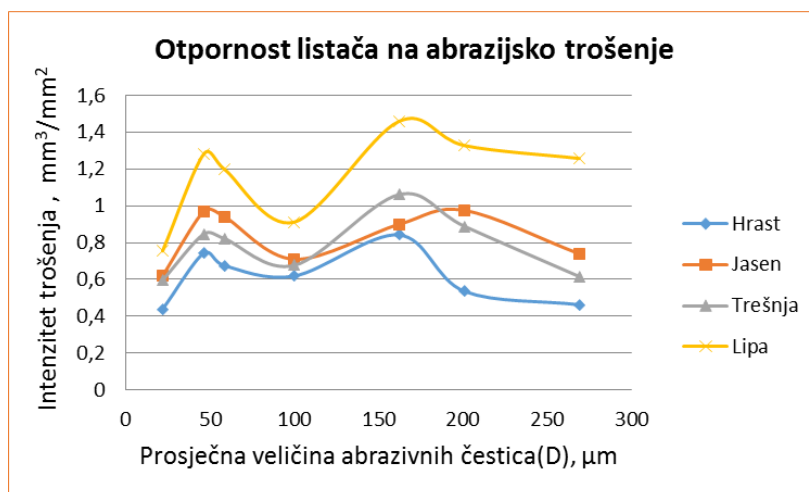
Veza između veličine abrazivnih čestica i intenziteta trošenja

Utjecaj poroznosti na intenzitet trošenja promatran je odvojeno za listače (difuzno i prstenasto porozne) i četinjače.

Na slici 5.3. prikazan je utjecaj veličine abrazivnih čestica na intenzitet trošenja difuzno i prstenasto poroznih listača.

Jasno je vidljivo da od svih vrsta listača, lipa ima najveći intenzitet trošenja kod svih kvaliteta brusnog papira. Lipa je difuzno porozna vrsta, u odnosu na druge ispitivane vrste listača ima sitnije pore, prisutne i identično raspoređene u ranom i u kasnom dijelu goda. Prstenasto porozne listače (hrast, jasen i trešnja) imaju izrazito nehomogenu građu goda i razlike u veličini pora između ranog i kasnog dijela goda su vrlo velike. Takva struktura pokazuje bolju otpornost prema abrazijskom trošenju od difuzno porozne.

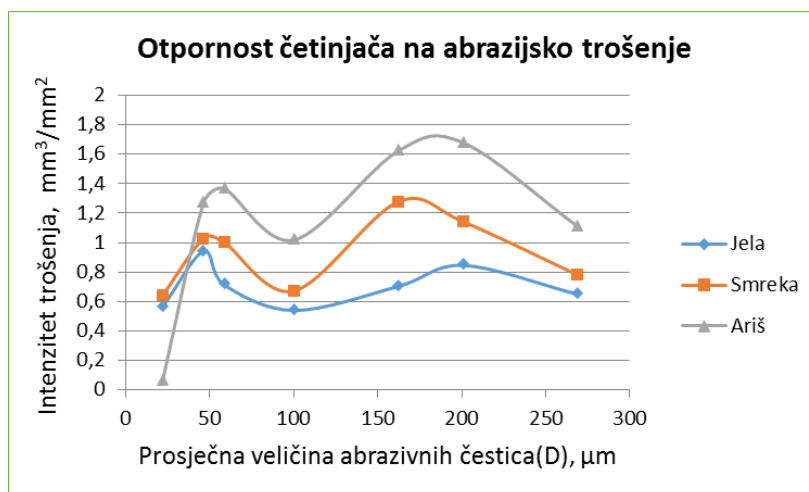
Na početku, porastom abrazivnih čestica intenzitet trošenja se povećava što je i očekivano. Kad veličina abrazivnih čestica dosegne vrijednost oko 50 μm dolazi do pada intenziteta trošenja kod svih ispitanih vrsta. Takav trend se nastavlja dok abrazivne čestice ne dosegnu vrijednost veću od 100 μm , nakon čega intenzitet trošenja ponovno raste. Neke vrste drva imaju maksimalni intenzitet trošenja kod vrijednosti veličine abrazivnih čestica od 162 μm , a neke kod 201 μm . Nakon toga se trošenje smanjuje kod svih vrsta. Daljnjim povećanjem abrazivnih čestica kod hrasta i lipe, intenzitet trošenja se ne mijenja i postaje neovisan o veličini abrazivnih čestica.



Slika 5.3. Utjecaj veličine abrazivnog zrna na intenzitet trošenja listača

Na slici 5.4. prikazan je utjecaj veličine abrazivnih čestica na intenzitet trošenja četinjača.

I ovdje je uočen sličan trend kao kod listača. Kod najfinijeg brusnog papira, najmanje intenzitet trošenja ima ariš. S povećanjem abrazivnih čestica, ovo se značajno mijenja i ariš postaje vrsta koja se najintenzivnije troši. Navedeno bi se moglo objasniti prisutnošću smole u drvu ariša. Dok su abrazivne čestice sitne (P800), smola popunjava prostor između čestica i smanjuje intenzitet trošenja. S povećanjem abrazivnih čestica, prisutnost smole ima sve manji značaj.



Slika 5.4. Utjecaj veličine abrazivnog zrna na intenzitet trošenja četinjača

6. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- u poprečnom presjeku kod vrsta iz skupine četinjača vide se traheide, nema velikih provodnih sudova (pora), a prijelaz iz ranog u kasni dio goda je postupan kod jele i smreke, a nagli kod ariša.
- u mikrostrukturi listača nalaze se veliki provodni sudovi (traheje ili pore). Kod hrasta, jasena i trešnje, pore su grupirane u ranom dijelu goda (prstenasto porozne), a kod lipe su ravnomjerno raspoređene po cijelom godu (difuzno porozna)
- sve ispitane četinjače imaju manju gustoću od listača
- kod listača je uočeno smanjenje intenziteta trošenja s porastom gustoće drva, dok se kod četinjača ne može uočiti ovisnost intenziteta trošenja o gustoći
- prstenasto porozne listače imaju izrazito nehomogenu građu goda i razlike u veličini pora između ranog i kasnog dijela goda su vrlo velike. Takva struktura pokazuje bolju otpornost prema abrazivskom trošenju od difuzno porozne strukture koju ima lipa
- velika razlika u intenzitetu trošenja uočena je između hrasta i trešnje, iako obje vrste pripadaju prstenasto poroznim listačama, a gustoća im se razlikuje svega 1%. Uzrok tome mogla bi biti razlika u veličini traheja u ranom dijelu goda.
- veličina abrazivnih čestica ima veliki i vrlo složen utjecaj na intenzitet abrazivskog trošenja. Na početku, s porastom abrazivnog zrna (do 50 μm) raste intenzitet trošenja, a nakon toga neočekivano pada i minimalnu vrijednost ima za veličinu čestica oko 100 μm . Nakon toga, za veličinu abrazivnih čestica između 162 μm i 201 μm trošenje doseže svoj maksimum, nakon čega se smanjuje, a kod lipe i hrasta postaje neovisno o veličini abrazivnih čestica.

LITERATURA

- [1] Drvo, https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1401970934-0-drvo_14.pdf, 14.03.2017.
- [2] Wood, <http://www.explainthatstuff.com/wood.html>, 14.03.2017.
- [3] Užar, J., Drvo – materijal u suglasnosti s prirodom, Tehnički glasnik, <http://hrcak.srce.hr/109570>, 14.03.2017.
- [4] Recenzirani materijali za predavanje, https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1496408466-0-drvo-skripta.pdf, 14.03.2017.
- [5] Gordić, Milan V., Sinteza i mehanička svojstva biomorfne SiC keramike, , <https://goo.gl/1hM3zS> , 14.03.2017.
- [6] Anatomija drva, <https://goo.gl/U4p2su>, 15.03.2017.
- [7] Kemijsko i toplinsko modificiranje drva, <http://repozitorij.fsb.hr/4557/1/Ljubo%20Krijan-Diplomski%20rad.pdf>, 14.03.2017.
- [8] Blažević, D., Primjena drva kao konstrukcijskog materijala, <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:340299>, 15.03.2017.
- [9] <https://goo.gl/xq99Yv>, 15.03.2017.
- [10] Structure and arrangement of pits, https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=19204, 29.03.2017.
- [11] Teoretska načela očuvanja drvene muzejske građe, hrcak.srce.hr/file/159863, 15.03.2017.??
- [12] http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2006000300006, 29.03.2017
- [13] <http://images.botany.org/set-13/13-048v.jpg>, 29.03.2017.
- [14] <https://steurh.home.xs4all.nl/engloof/elooft.html#grondweefsel>, 29.03.2017.
- [15] Celuloza, <http://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=celuloza>, 01.04.2017.
- [16] Structure and Properties of Hemicellulose, <http://web.nchu.edu.tw/pweb/users/taiwanfir/lesson/10393.pdf>, 01.04.2017.

- [17] Strukar, K., Primjena drva u suvremenom građenju zgrada, <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:468733>, 01.04.2017.
- [18] Nauka o drvetu i njegova primjena u mašinstvu, <http://docslide.net/documents/drvo.html>, 01.04.2017.
- [19] Gustoća drva, <http://hrovat.net/o-drvu/gustoca-drva/>, 06.04.2017.
- [20] Norma; ISO 13061 – 2:2014, Physical and mechanical properties of wood -- Test methods for small clear wood specimens -- Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests
- [21] <http://www.sumari.hr/sumlist/pdf/200102630.pdf>, 06.04.2017.
- [22] Biološke osobine drva, <https://www.fsb.unizg.hr/kmb/200/220/kmb221.htm>, 20.04.2017.
- [23] Wood and moisture, <http://www.wood-database.com/wood-articles/wood-and-moisture/>, 20.04.2017.
- [24] Moisture of properties of woods, <http://www.woodproducts.fi/content/moisture-properties-wood>, 20.04.2017.
- [25] Što treba znati o drvu?, <http://www.napravi-sam.com/clanci/sto-treba-znati-o-drvu/>, 27.04.2017.
- [26] Tehnološki projekat sušenja drveta, <http://prodajaiizradaradova.ldinstitut.com/wp-content/uploads/2014/11/008-Tehnolo%C5%A1ki-projekat-su%C5%A1enja-drveta.pdf>, 28.04.2017.
- [27] Kučić-Mirković, S., Opća svojstva tehničkih materijala, http://www.ss-tehnicka-strojarstvoibrodogradnja-ri.skole.hr/dokumenti?dm_document_id=150&dm_dnl=1, 27.04.2017.
- [28] Mehanička svojstva drva, <http://prozori.info/169-mehanicka-svojstva-drva#.WOY7eLiGNPY>, 27.04.2017.
- [29] Drvo, Enciklopedija leksikarskog zavoda, M. Krleža, <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=16354>, 27.04.2017.
- [30] Mehanička svojstva drva, https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1402046311-0-drvo_vjeza_14.pdf, 27.04.2017.

- [31] Ispitivanje tvrdoće drveta, <http://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/1012/820/ispitivanje-tvrdoce-drveta>, 27.04.2017.
- [32] Osnove nauke o drvu i izrada proizvoda iz masivnog i usitnjenog drva, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1985.g., <https://www.scribd.com/doc/153232293/OSNOVE-NAUKE-O-DRVU>, 27.04.2017.
- [33] <http://teachingresources.grantadesign.com/charts>, 27.04.2017.
- [34] Hansen, H., Acoustic Studies on Wood, University of Canterbury, 2006. g., https://ir.canterbury.ac.nz/bitstream/handle/10092/1746/thesis_fulltext.pdf;sequence=1, 28.04.2017.
- [35] <https://plot.ly/~mrllyule/330.embed>, 27.04.2017.
- [36] Abrazijsko trošenje, https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1333523730-0-im5_trosenje12.pdf, 28.04.2017.
- [37] Thermal properties of wood, <http://www.woodproducts.fi/content/wood-a-material-2>, 28.04.2017.
- [38] Zašto drvo, <http://stolarskiobrt-juric.hr/zasto-drvo/>, 28.04.2017.
- [39] Boja drva, <http://korak.com.hr/korak-024-prosinac-2008-boja-drva/>, 01.05.2017.
- [40] Estetske karakteristike drva, <http://hrovat.net/o-drvu/estetske-karakteristike-drva/>, 01.05.2017.
- [41] Tekstura, Enciklopedija leksikarskog zavoda, M. Krleža, <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=60696>, 01.05.2017.
- [42] Norma ASTM: G 65 - 85: Conducting dry sand/rubber wheel abrasion tests